



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

СОДЕРЖАНИЕ**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ**

Одинокое С.Б. XIII Международная конференция «Голоэкспо-2016». Краткие итоги	4
Сагателян Г.Р., Одинокое С.Б., Кузнецов А.С., Ковалев М.С., Сафт М.В., Попов В.В. Получение голограммных и дифракционных оптических элементов методом плазмохимического травле- ния в стекле	8
Колючкин В.В., Злоказов Е.Ю., Одинокое С.Б., Пириутин Н.В., Талалаев В.Е., Цыганов И.К., Воскресенская О.И., Москвичёв Н.В. Метод контроля качества защитных голограмм на основе косвенного измерения периода и глубины поверхностного микрорельефа	13
Жердев А.Ю., Одинокое С.Б., Лушников Д.С., Кайтуков Ч.Б. Дифракционные линзы для оптической системы получения голограммных стереограмм	17
Жердев А.Ю., Лушников Д.С., Маркин В.В., Одинокое С.Б., Смирнов А.В. Разработка оптической схемы для одноэтапного получения цветных совмещённых голограммных стереограмм	23
Дорошина Ю.П., Насыров Р.К., Одинокое С.Б., Полещук А.Г., Сенник Б.Н. Перспективы применения голограммных элементов для юстировки внеосевых оптических систем	28
Белокопытов А.А., Курт В.И., Муслимов Э.Р., Скочилов А.Ф. Двойной монохроматор с вогнутыми голограммными дифракционными решетками	34
Ахметов М.М., Белозёров А.Ф., Балоев В.А., Белокопытов А.А., Гайнутдинов И.С., Иванов В.П., Лукин А.В., Мельников А.Н., Могилюк И.А. Научно-производственный комплекс серийной прецизион- ной репликации элементов асферической и дифракционной оптики	39
Тугаринов С.Н., Белокопытов А.А., Лукин А.В., Науменко Н.Н., Саттаров Ф.А., Серов В.В., Шигапова Н.М., Ярцев В.П. Новый класс спектрометров-полихроматоров высокого разрешения на основе пропускающих объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток	43
Хорохоров А.М., Чурляев Ф.А., Ширанков А.Ф. Адаптивная стереофундус-камера для получения 3d изображения сетчатки глаза пациента с высоким пространственным разрешением	50



СОДЕРЖАНИЕ

(продолжение)

Павлов В.Ю., Пясецкий В.Б., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Методика расчета световой эффективности RGB-кластеров <i>ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ</i>	53
Лукашевич Я.К. Оптимизация технологии изготовления решеток-поляризаторов соответственно их применению	58
Волков В.Г., Случак Б.А. Новые лазерные приборы наблюдения	62
Дьякова И.И. Способ центрирования в оправе линз, работающих в инфракрасной области спектра	71
Синчугов К.М. Технологии двусторонней обработки плоских поверхностей оптических деталей	75
Азербайев А.А., Мухаммедзянов Т.Р., Абдулкадыров М.А., Баландин В.Ю. Нанесение отражающих покрытий на оптические детали диаметром до 4 м методом магнетронного распыления	83
Пелих С.А., Пелих И.С. Государственное регулирование построения экономико-организационного механизма производства наукоемкой машиностроительной продукции	92

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ



**ХIII
МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ГОЛОЭКСПО-2016»**



**Россия
отель «Ринг-Премьер»
г. Ярославль
12 - 15 сентября 2016 года**

КРАТКИЕ ИТОГИ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ XIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ГОЛОЭКСПО–2016»,
прошедшей 12 - 15 сентября 2016 г.
в отеле «Ринг-Премьер», Россия, г. Ярославль

ОДИНОКОВ С.Б. – председатель Оргкомитета XIII Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2016», доктор технических наук, профессор

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

E-mail: odinokov@bmstu.ru

Развитие микро-нано-фотоники и оптоэлектроники в настоящее время является одной из приоритетных задач научно-технического прогресса, частью которых оптическая голография. В последние годы много внимания, как в России, так и за рубежом, уделяется активному внедрению голографических технологий и методов в самые различные отрасли оптической и оптико-электронной науки и техники.

Примером этого может служить развитие защитной голографии с получением цветных 3D изображений, применение голограммных и дифракционных оптических элементов (ГОЭ-ДОЭ) в 3D дисплеях и системах отображения изображений, применение компьютерных методов синтеза голограмм для отображения информации и в изобразительной голографии и др.

В связи с этим проведение ежегодных Международных конференций «ГОЛОЭКСПО» является очень своевременным и актуальным научно-техническим мероприятием, а также позволяет оценить состояние рынка голографической продукции, новейших научно-технических разработок в области голографии и определить ее основные направления развития.

XIII Международная Конференция «ГОЛОЭКСПО–2016» проводилась 12 - 15 сентября 2016 г. в отеле «Ринг-Премьер», Россия, г. Ярославль, ул. Свободы, 55.

Организаторами XIII Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2016» выступили:

- Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия),
- АО «НПО «Криптен» (г. Дубна, Россия),
- ЗАО «Голографическая Индустрия» (г. Минск, Республика Беларусь),
- ООО «Хологрэйт», (г. Санкт-Петербург, Россия),
- ФГУП «НТЦ «Атлас» (г. Москва, Россия),
- АО «НПО Государственный институт прикладной оптики» (г. Казань, Россия),
- ООО «Регула» (г. Минск, Республика Беларусь),
- Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, (г. Самара, Россия),
- ООО «Микро и наноголографические системы» (г. Москва, Россия)

Генеральным спонсором конференции выступило

– АО «Научно-производственное объединение «Криптен»» (г. Дубна, Россия).

Спонсорами конференции являлись:

– ЗАО «Голографическая индустрия», г. Минск, Республика Беларусь

– ООО «Хологрэйт», г. Санкт-Петербург, Россия

– ФГУП «Научно-технический центр «Атлас», г. Москва, Россия

– ООО «Регула», г. Минск, Республика Беларусь

– ООО «Микро и наноголографические системы», г. Москва, Россия

– АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань, Россия

Устроителем конференции выступил:

– ООО «Микро и наноголографические системы» (г. Москва, Россия).

Информационная и рекламная поддержка была оказана журналами «Водяной Знак» (г. Санкт-Петербург, Россия), «Мир техники кино» (г. Москва, Россия), «Фотоника» (г. Москва, Россия).

Конференция проводилась при поддержке:

– *Министерства образования и науки РФ, департамента науки и технологий*

– *ведущих университетов и научно-исследовательских институтов России:*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Санкт-Петербургский государственный национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербургский физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ им. М.В. Ломоносова), Российский университет дружбы народов (РУДН, г. Москва, Россия), Самарский государственный аэрокосмический университета им. С.П. Королева (СГАУ им. С.П. Королева), Самарский институт систем обработки изображения РАН, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ (КНИТУ–КАИ), Общественная научно-техническая академия «Контенант» (г. Красногорск) и др.

– *ведущих научно-производственных предприятий России:* АО «НПО «Криптен» (г. Дубна), АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики» (г. Казань), ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» (г. Красногорск), ФГУП «НТЦ АТЛАС» (г. Москва), ООО «Хологрэйт» (г. Санкт-Петербург), ООО «Микро и наноголографические системы» (г. Москва), ООО «Наноточность» (г. Москва), АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (ГОИ им. С.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург), АО «Швабе» (г. Санкт-Петербург), АО «Славич» (г. Переславль-Залесский) и др.

– *ведущих университетов и предприятий Республики Беларусь* (г. Минск): ЗАО «Голографическая индустрия», ООО «Магия света», Белорусского государственного университета, ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова» Национальной академии наук Беларуси, Белорусского оптико-механического объединения и др.

– *зарубежных компаний и фирм в области голографии*: OpSec Security (Великобритания), Концерн «Демакс» (Болгария), ADL Optica GmbH (Германия), Process Color, Ignetta Ernakulam (Индия), «Geola digital UAB» (Литва), Институт голографии (Греция) и др.

– *Международной Ассоциации Производителей Голограмм (ИНМА)* в лице директора по выставкам Микаэла Сидорова (Великобритания).

На открытии с приветственным словом выступили:

– Одинокоев Сергей Борисович, председатель Организационного комитета «Голоэкспо-2016», доктор технических наук, профессор;

– Танин Леонид Викторович, председатель Совета директоров ЗАО «Голографическая индустрия», академик Международной инженерной академии, г. Минск, Республика Беларусь;

– Смирнов Андрей Валентинович, технический директор АО «НПО «Криптен», г. Дубна, Россия

– Лукин Анатолий Васильевич, доктор технических наук, «АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань, Россия

– Богачевская Елена Николаевна, генеральный директор ООО «Хологрэйт», г. Санкт-Петербург, Россия

– Сеник Богдан Николаевич, доктор технических наук, профессор, ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», президент Общественной научно-технической академии «Контенант», г. Красногорск, Россия

Конференция проводилась в соответствии с программой в зале, вместившем с учетом аспирантов и студентов более 120 человек. Присутствовали представители таких организаций, как ООО «ХолоГрэйт» (г. Санкт-Петербург, Россия), ФГУП «НТЦ «Атлас» (г. Москва, Россия), АО «НПО «Криптен»» (г. Дубна, Россия), ВНИИ Опτικο-Физических Измерений (г. Москва, Россия), Институт автоматизации и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск, Россия), Институт систем обработки изображений (г. Самара, Россия), Физический институт РАН (г. Москва, Россия), ЗАО «Голографическая индустрия» (г. Минск, Республика Беларусь), ООО «Магия Света» (г. Минск, Республика Беларусь), «Geola digital UAB» (г. Вильнюс, Литва), АО «Славич» (г. Переславль-Залесский, Россия) и многих других.

Всего на конференции было зарегистрировано 105 участников, в том числе:

России – 94 участника, Республики Беларусь – 7 участников, Литвы – 1 участник, Киргизии – 1 участник, Республики Молдова – 2 участника.

Из всех участников докладчиками являлись: 72 докладчика из России, 4 докладчика из Республики Беларусь, 1 докладчик из Литвы, 1 докладчик из Киргизии, 1 докладчик из Республики Молдова.

Все состоявшиеся 41 пленарных и секционных докладов были разбиты на тематические секции:

- Пленарных докладов по наиболее важным темам в области голографии – 14 докладов;

- Технологии в области защитных голограмм – 6 докладов;
- Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики – 6 докладов;
- Объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии – 5 докладов;
- Голограммные и дифракционные оптические элементы: методы компьютерного синтеза, метаматериалы, плазмонные структуры и технологии изготовления – 5 докладов;
- Голографическая интерферометрия, голографическая память, оптико-голографическая обработка информации – 5 докладов.

Также было заявлено 45 стендовых докладов, а фактически представлено на конференции было 28 стендовых докладов.

Общее число докладов составило - 69 докладов.

По мнению организаторов, участников и гостей XIII Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2016» конференция состоялась как событие, органично сочетающее в себе производственный потенциал, инженерные и научные идеи, предпринимательские интересы.

По итогам прошедшей конференции участниками были сформулированы следующие наиболее актуальные направления в оптической голографии:

1) в области защитной голографии – разработка новых защитных признаков, в том числе связанных с формированием цветных голографических изображений с элементами движения и динамики, цветных скрытых изображений, комбинирование цветных 3D аналоговых изображений с цифровыми изображениями, а также внедрение в практику новых фоточувствительных материалов для защитной голографии (фотополимеры, метаматериалы и др.);

2) в области изобразительной голографии – широкое внедрение компьютерных методов синтеза цветных 3D цифровых голограмм, а также создание мобильных лазерных установок для записи цветных голограмм уникальных объектов истории и искусства по методу Ю.Н.Денисюка;

3) в области создания дифракционных и голограммных оптических элементов, голографической интерферометрии и микроскопии, корреляционных систем распознавания изображений и голографической памяти – широкое внедрение компьютерных методов моделирования и цифрового синтеза голограмм, голографических фильтров и др.

По итогам проведения конференции «ГОЛОЭКСПО-2016» Оргкомитетом было принято решение о проведении следующей XIV Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2017», 12-15 сентября 2017 г. О месте проведения конференции будет сообщено дополнительно и представлено на сайте www.holoexpo.ru.

ПОЛУЧЕНИЕ ГОЛОГРАММНЫХ И ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ В СТЕКЛЕ

САГАТЕЛЯН Г.Р., ОДИНОКОВ С.Б., КУЗНЕЦОВ А.С., КОВАЛЕВ М.С., САФТ М.В., ПОПОВ В.В.*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

E-mail: odinokov@bmstu.ru

Решение задачи ступенчатого профиля. Параметры вращения при обработке деталей. Оптимальные режимы селективности травления. Экспериментальная часть процессов. Закономерности процессов. Объяснение закономерностей.

Ключевые слова: формирование микропрофиля глубиной 1 мкм, плазмохимическое травление, формирование микрорельефа, результаты исследований.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование конструкций оптических систем, создаваемых на основе таких деталей как дифракционные решетки (ДР), дифракционные оптические элементы (ДОЭ), голограммные оптические элементы (ГОЭ) требует новых технологических разработок [1, 2]. Отличительной особенностью указанного класса деталей является то, что для их изготовления необходимо формировать микропрофиль глубиной в пределах 1 мкм, обладающий заданными геометрическими параметрами по глубине и вдоль поверхности, причем элементы профиля имеют период, составляющий 0,5 – 5 мкм.

Микропрофиль формируют травлением оптического стекла, осуществляемым во фторсодержащей плазме – плазмохимическим травлением (ПХТ). Для реализации этого процесса в МГТУ им. Н.Э. Баумана эксплуатируется установка плазмохимического травления “Caroline 15 PE”. До настоящего времени надежных методов создания рельефов со ступенчатым многоуровневым заданным профилем не существует. Это обусловлено сложностью сопровождающих ПХТ стекла процессов [3-5].

Перспективным представляется изготовление ДОЭ-ГОЭ из заготовок фотошаблонов (ФШ), применяемых в технологии интегральных микросхем (ИМС). В настоящее время заготовки ФШ ИМС изготавливают как из кварца, так и из силикатного стекла, близкого по оптическим характеристикам к стеклу К8. Отличительной особенностью заготовок ФШ ИМС является то, что они содержат нанесенный методом тонкопленочной технологии на функциональную поверхность слой хрома толщиной $h = 50 - 200$ нм.

Функциональный микрорельеф рабочей поверхности ДОЭ-ГОЭ (рис. 1) представляет собой регулярно расположенные идентичные микронеровности, ограничивающие объем 1 оптического стекла, из которого изготовлена заготовка ФШ ИМС. Этот микрорельеф получен удалением оптического стекла из микрообъемов 2 за счет локального микровытравливания.

Для формирования ступенчатого профиля в стекле необходимо решить две задачи:

1. получить многоуровневый рельеф в материале маски, применяемой при плазмохимическом травлении стекла;
2. Обеспечить требуемую селективность

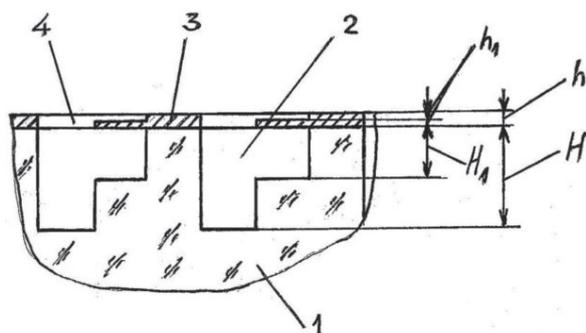


Рисунок 1.

Схема формирования ступенчатого функционального микрорельефа ДОЭ-ГОЭ:
1 – оптическое стекло; 2 – удалённый объём поверхностного слоя; 3 – защитная маска; 4 – удалённый объём тонкопленочного покрытия

ПХТ стекла относительно материала маски.

Решение первой задачи, а именно, придание переменной толщины слою хрома на заготовке ФШ ИМС в процессе создания маски возможно лишь нанотехнологическими методами - путем удаления микрообъемов 4 сфокусированным ионным пучком (СИП). Современная технология фокусированного ионного пучка характеризуется способностью фокусировки ионного зонда до диаметра 5 нм [6]. Технологически достижимые минимальные размеры элементов маски в горизонтальной плоскости можно оценить величиной в диапазоне 15 – 70 нм, а по глубине – от нескольких до нескольких десятков нанометров [7, 8]. Используя имеющееся в МГТУ им. Н.Э. Баумана оборудование можно получать в материале маски ступенчатый рельеф с любым числом уровней на глубину до 50 нм.

Решая вторую задачу, отметим, что достижимая глубина функционального микрорельефа определяется селективностью травления r , представляющей собой соотношение скоростей травления стекла и материала маски.

Как можно видеть из рис. 1, селективность травления определяется соотношениями

$$r = \frac{H}{h} = \frac{H_1}{h - h_1}, \quad (1)$$

где: H и H_1 – максимальная и текущая глубины требуемого микрорельефа ДОЭ-ГОЭ; h и h_1 – максимальная и текущая толщины маски.

Аналитические исследования процесса ПХТ [9] в настоящее время не дают достаточного количества информации для технологического проектирования операций ПХТ применительно к конкретному технологическому оборудованию.

Экспериментальные исследования электрофизических характеристик установок ПХТ [10] позволили установить ряд закономерностей формирования токов (ионного, электронного) и напряжений (в частности – напряжения смещения) в рабочей камере. Однако эти исследования также не позволяют устанавливать непосредственную аналитическую взаимосвязь между электрофизическими параметрами установки и выходными параметрами процесса ПХТ – такими, например, как глубина микрорельефа на сформированной функциональной поверхности ДОЭ-ГОЭ.

Некоторые результаты экспериментальных исследований по применению установки Caroline 15 PE для протравливания монокристаллического кварца на большие глубины – свыше 200 мкм – представлены в работе [11] без подробного описания условий и режимов операции ПХТ. В частности, не раскрыт материал маски, способ её получения и толщина, необходимая для травления на глубины порядка десятков микрометров.

Определенные результаты были получены нами ранее [12].

Таким образом, максимальность селективности травления r должна быть обеспечена на основе проведения экспериментальных исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе предварительных экспериментальных исследований для достижения полирующего (в отличие от матирующего) ПХТ на установке Caroline 15 PE применяли следующий режим травления: расход травящего газа (фреон CF_4) – $C_{CF_4} = 2,4$ л/мин; расход плазмообразующего газа (аргон) – $C_{Ar} = 0,8$ л/мин; расход газа, охлаждающего столлик (гелий) – $C_{He} = 1,2$ л/мин; ток подмагничивания в катушках, охватывающих камеру с

плазмой, $I = 2,0$ А; мощность, подаваемая на антенну, $- P_a = 250$ Вт; мощность, подаваемая на столик, $- P_{cm} = 250$ Вт; частота вращения n ротора турбомолекулярного насоса – 100% от номинальной. При этом напряжение автосмещения на столике U_{cm} и давление в рабочей камере p формируются в ходе самого процесса травления и при проведении экспериментальных исследований составляли: $U_{cm} = 320 - 380$ В; $p = 0,1 - 0,2$ Па.

Полученные на основе профилографических исследований, проведенных на профилографе-профилометре мод. 1500-а Kasaka laboratory / Япония результирующие графики зависимости влияния продолжительности процесса ПХТ t на глубину H канавок ДР представлены на рис. 2.

Глубина профиля определялись на двух этапах: 1) после реализации собственно операции ПХТ; 2) после операции кислотного травления (КТ), которая производилась для удаления остатков хромовой маски. При этом также частично удалялась пленка, образовавшаяся в результате протекания нежелательной газотранспортной реакции – так называемая «высадка». Кислотное травление

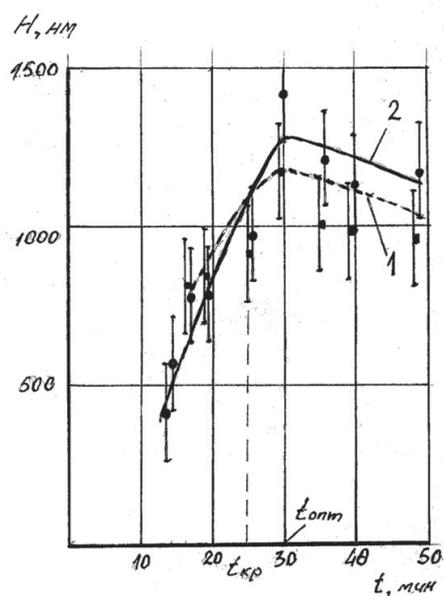


Рисунок 2.

Зависимости глубины канавок H дифракционных решеток (ДР) от продолжительности t операции плазмохимического травления (ПХТ), получаемой после операции ПХТ (кривая 1) и после операции кислотного травления (КТ), следующей за операцией ПХТ (кривая 2)

проводили в кипящей серной кислоте.

Операцию ПХТ оптического стекла следует производить на наиболее рациональном (оптимальном) режиме. Оптимальным является тот режим, который обеспечивает максимум селективности травления. Если исходить из того, что максимум глубины полученного нанотехнологическими методами микрорельефа в маске составляет 50 нм, а требуемая глубина микрорельефа микрооптической детали составляет 1 мкм, то селективность травления должна ориентировочно составлять $r = 20$.

Для нахождения оптимального режима ПХТ произвели серию экспериментов. Исследовали влияние соотношения расходов плазмообразующего (аргон) и химически активного (фреон) газов на целый ряд выходных параметров процесса ПХТ. Результаты указанной серии экспериментов представлены в виде множества графиков на рис. 3. Эти зависимости получены при фиксации прочих условий процесса (мощности на антенне и столике, ток подмагничивания, расход гелия, скорость турбомолекулярного насоса) на тех же уровнях, что и в предыдущих экспериментальных исследованиях.

Из рассмотрения графиков на рис. 3 видно, что зависимости интересующего нас параметра – селективности травления r – от расходов как аргона, так и фреона, носят ярко выраженный экстремальный характер, т.е. имеют максимумы. Можно считать установленным оптимальный режим ПХТ стекла на установке Caroline 15 PE – он соответствует расходу аргона $C_{Ar} = 0,8$ л/мин при одновременном расходе фреона $C_{CF_4} = 2,4$ л/мин.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рассмотрения кривых 1 и 2 на рис. 2 можно заметить следующие закономерности и особенности относительно характера влияния продолжительности операции ПХТ на формируемую глубину канавки ДР:

1) обе кривые 1 и 2 имеют максимум глубины канавок при продолжительности процесса ПХТ $t_{opt} = 30$ мин.

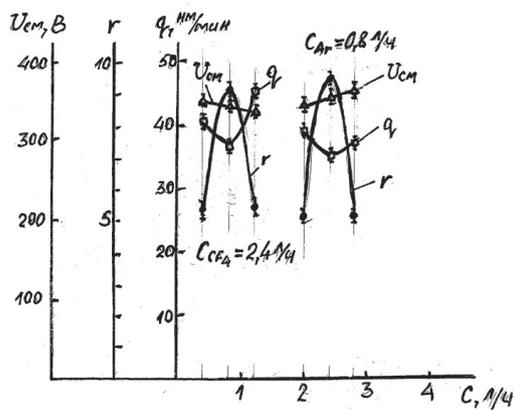


Рисунок 3.

Зависимости производительности q и селективности r травления, а также напряжения смещения U_{cm} , от расходов C аргона (Ar) и фреона (CF_4)

2) при продолжительности процесса ПХТ $t < t_{кр}$ глубины канавок ДР, измеренные после операции ПХТ, превышают глубины тех же канавок, измеренные после операции КТ, а при продолжительностях процесса ПХТ $t > t_{кр}$ глубины канавок ДР, измеренные после операции ПХТ, оказываются меньше глубин тех же канавок, измеренных после операции КТ. При продолжительности процесса $t = t_{кр}$ глубина канавок ДР после выполнения операции КТ не изменяется;

Обнаруженные закономерности и особенности могут быть объяснены следующим образом:

1) в момент $t = t_{онм}$ происходит практически полное удаление хромовой маски – на защищенных маской участках могут остаться лишь отдельные, не связанные между собой остатки маски в виде островков. Из-за более интенсивного срабатывания вершин микропрофиля с увеличением времени травления при $t > t_{онм}$ глубина канавок уменьшается.

2) Удаление обрабатываемых материалов происходит одновременно с ростом пленки полимера («высадкой»). Пленка растет и на хrome, и на стекле, и при этом скорость роста пленки на хrome может быть выше или ниже скорости роста пленки на стекле. Одновременно скорость травливания стекла намного выше скорости травливания хрома. В момент времени $t = t_{кр}$ оказывается, что толщина пленки на стекле равна в точности сумме двух толщин – толщины остаточно-

го слоя хрома и толщины пленки, выросшей на хrome.

Объяснить наличие максимумов в зависимостях $r = f(C_{Ar})$ и $r = f(C_{CF_4})$, представленных на рис. 3, можно следующим образом.

Атомы аргона в высокочастотной (ВЧ) плазме распадаются на положительно заряженные ионы и электроны. Увеличение расхода аргона приводит (как это можно заключить из графика) к уменьшению напряжения автосмещения U_{cm} на столике, т.е. к увеличению плотности электронов в плазме. При расходах аргона свыше $C_{Ar} = 1$ л/мин это приводит к росту производительности травления q . Однако при малых расходах аргона вследствие увеличения напряжения смещения U_{cm} его ионы удаляют растущую пленку полимера более эффективно, и производительность травления q возрастает. В результате производительность ПХТ q имеет экстремум – минимум в зависимости от расхода плазмообразующего газа – аргона.

Можно предположить, что максимум селективности травления оптического стекла через хромовую маску соответствует минимуму скорости травления стекла, т.е. при этом скорость травления хрома уменьшается ещё более выраженно.

Считается, что молекулы фреона в той же плазме приобретают лишь неспаренность электронов, превращаясь в радикалы, хотя также возможно и образование из молекулы фреона свободных электронов и сложных положительно и отрицательно заряженных ионов. Первый процесс (образование радикалов) объясняет рост производительности ПХТ с увеличением расхода фреона свыше $C_{CF_4} = 2,4$ л/мин. Второй процесс (образование свободных электронов), как это можно заключить из уменьшения напряжения смещения U_{cm} , проявляется при уменьшении расхода фреона ниже $C_{CF_4} = 2,4$ л/мин. В этом случае интенсифицируется образование ионов аргона, интенсификация удаления растущей полимерной пленки и возрастание производительности q ПХТ. В результате производительность ПХТ q имеет экстремум – минимум также и в зависимости от расхода химически активного газа – фреона.

Таким образом, положение о том, что максимум селективности травления стекла q наблюдается при минимизации скоростей травления стекла q можно считать более обоснованным.

Для оценки полноты решения задач заметим, что, согласно представленным на рис. 3 данным, селективность травления составляет $r = 7 \dots 9$.

Следовательно, при имеющихся технологических возможностях возможно формирование ступенчатого микрорельефа глубиной 350 – 450 нм.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлены следующие наиболее рациональные технологические режимы ПХТ силикатного стекла заготовок ФШ ИМС на установке Caroline 15 PE: расход травящего газа (фреон C_{F4}) – $C_{CF4} = 2,4$ л/мин; расход плазмообразующего газа (аргон) – $C_{Ar} = 0,8$ л/мин; расход газа, охлаждающего столик (гелий) – $C_{He} = 1,2$ л/мин; ток подмагничивания в катушках, охватывающих камеру с плазмой, $I = 2,0$ А; мощность, подаваемая на антенну, $P_a = 250$ Вт; мощность, подаваемая на столик, $P_{cm} = 250$ Вт; частота вращения ротора турбомолекулярного насоса – 100% от номинальной; напряжение автосмещения на столике $U_{cm} = 320 - 380$ В; давление в рабочей камере $p = 0,1 - 0,2$ Па.

2. На основании анализа и объяснения физической сущности обнаруженных закономерностей и особенностей процесса ПХТ, можно сформулировать следующие выводы и рекомендации по построению технологической операции ПХТ при изготовлении ДОЭ:

- для достижения максимальной глубины канавок ДР, необходимо соблюдать условие $t = t_{omm}$. При большей или меньшей продолжительности операций ПХТ относительно величины t_{omm} глубина канавок ДР будет меньше максимально достижимой;

- полностью использовать возможности, предоставляемые толщиной маски, можно, обеспечивая за счет подбора оптимального режима ПХТ максимальность селективности r травления стекла относительно материала маски, исходя из того, что максимум селективности травления соответствует минимуму производительности процесса ПХТ.

Список литературы

1. Безус Е.А., Досколович Л.Л. Расчет и моделирование дифракционных структур для формирования двумерных интерференционных картин поверхностных электромагнитных волн. Компьютерная оптика. – Т.33. – 2009, № 1. – С. 10 – 17.
2. Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Трезуб В.И. Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов. – Компьютерная оптика. – Т.34. – 2010, №4. – С. 481 – 487.
3. Jesenko A., Popovic D., Milosavlevic V. Measurement of etch rate for SiO₂ single crystal treated with DC-plasma. - Publ. Astron. Obs. Belgrade No. 89 (2010), 293-296.
4. CF₄ plasma etching of materials used in microelectronics manufacturing / O.V. Balachova, M.A.R. Alvesa, J.W. Swarta at alias. - Microelectronics Journal 31 (2000) 213–215.
5. Inductively coupled plasma etching of graded-refractive-index layers of TiO₂ and SiO₂ using an ITO hard mask / A/ N. Noemaun, F. W. Mont, J. Cho at alias. - J. Vac. Sci. Technol. A 29(5), Sep/Oct 2011. – P. 051302-1- 051302-6.
6. Метод сфокусированного ионного пучка при формировании наноразмерных структур в микрофлюидных чипах / А.А. Евстапов, И.С. Мухин, И.В. Кухтевич и А.С. Букатин. - Письма в ЖТФ, 2011, том 37, вып. 20. – С. 32 – 40.
7. Агеев О.А., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г. Формирование наноразмерных структур на кремниевой подложке методом фокусированных ионных пучков. - Известия вузов. Электроника. - № 1(87), 2011. – С. 29 – 34.
8. Оценка стойкости алмазоподобных защитных покрытий к высокоэнергетическому ионному воздействию / Я. Б Волкова, П. А. Михалев, А. С. Осипков и др. - Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013, № 8. – С. 185 – 198. DOI: 10.7463/0813.0605449
9. Казанский Н.Л., Колтаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда. – М.: Радио и связь, 2009. – 220 с.
10. Дудин С.В. Исследования и разработка технологических систем на базе ВЧ индукционного разряда для реактивного ионно-плазменного травления микро- и наноструктур. – Физическая инженерия поверхности. – Т.7, №3, 2009. – С. 171 – 194.
11. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. – М.: Техносфера, 2010. – 544 с.
12. Создание ДОЭ для формирования точечных эталонных изображений в оптических системах / С.Б. Одинокоев, Г.Р. Сагателян, М.С. Ковалев и др. – Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 341 – 352.

МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ НА ОСНОВЕ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРИОДА И ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА

КОЛЮЧКИН В.В.*, ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.*, ОДИНОКОВ С.Б.*, ПИРЮТИН Н.В.*, ТАЛАЛАЕВ В.Е.*,
ЦЫГАНОВ И.К.*, ВОСКРЕСЕНСКАЯ О.И.***, МОСКВИЧЁВ Н.В.**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**НИИ – филиал АО «Гознак»

E-mail: odinokov@bmstu.ru

Разработка метода оценки качества ЗГ. Исследование параметров распределения в виде графиков. Измерение параметров микрорельефа.

Ключевые слова: недостатки метода измерения, косвенный метод измерения по дифракционному распределению, приведены результаты расчетов.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является разработка метода, позволяющего осуществлять объективную оценку качества ЗГ. О качестве защитных голограмм можно судить по соответствию значений параметров рельефа этих решеток эталонным. Качество конкретного образца ЗГ зависит от значений основных параметров ДР. Такими основными параметрами элементарной ДР – голопикселя, являются:

- пространственная частота ν_x или период ;
- глубина d фазового рельефа;
- количество N периодов в голопикселе;
- ориентация φ ДР.

Так как период решёток имеет значение порядка 1 мкм, то для контроля перечисленных параметров иногда применяют метод, основанный на прямом измерении с использованием микроскопов, в том числе конфокальных или атомно-силовых микроскопов [1]. Недостатками этого метода являются трудоёмкость и длительность проведения измерений параметров профиля, а также дороговизна измерительного оборудования.

Альтернативой методу прямых измерений является косвенный метод измерения, когда о параметрах ДР можно судить на основе анализа дифракционного распределения [2].

В настоящей работе приводятся результаты исследований, позволяющие по параметрам дифракционного распределения оценивать параметры поверхностного микрорельефа голографических и дифракционных оптических элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На основе скалярной теории дифракции [3] была разработана программа и выполнены исследования зависимости перечисленных параметров дифракционного распределения от параметров ДР с гармоническим фазовым распределением. Результаты расчётов представлены в виде графиков.

На рис. 1 для различных длин волн излучения представлены графики зависимости распределения интенсивности в 1-ом порядке дифракции излучения от глубины рельефа ДР с периодом 1,5 мкм при падении излучения по нормали. Зависимости представлены для излучения с длинами волн 400, 500, 600, 650, 700 нм.

На рис. 2, в качестве примера, представлены графики зависимости распределения интенсивности в 1-ом и 2-ом порядках дифракции от глубины рельефа ДР при падении излучения под углом 60°. Зависимости представлены для излучения с длиной волны 405 нм.

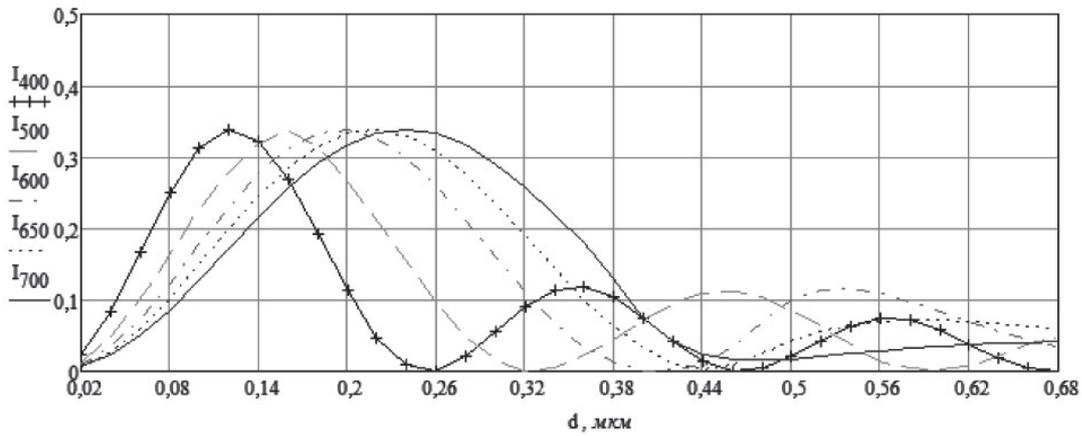


Рисунок 1.
Распределение интенсивности при $T=1$ мкм

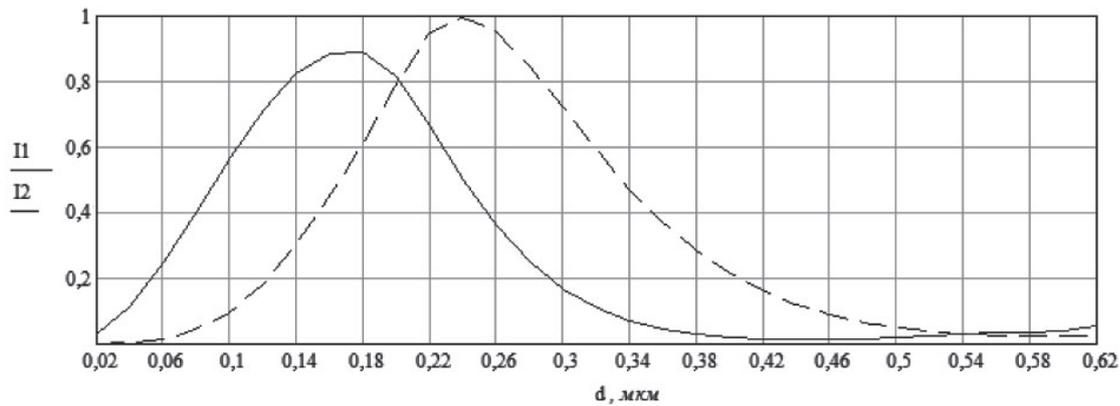


Рисунок 2.
Распределение интенсивности при $T=1$ мкм при угле падения 60°

Зная теоретические расчетные зависимости, можно измерить глубину микрорельефа, зарегистрировав значение интенсивности излучения в 1-ом и 2-ом порядках дифракции с помощью фотоприемного устройства.

Функциональная схема устройства контроля глубины поверхностного микрорельефа защитных голограмм, основанного на предложенном методе, представлена на рис. 3.

Принцип действия устройства представляется следующим образом. Излучение от лазерного диода падает под углом α на контролируемый образец ДОЭ-ГОЭ. Значения интенсивности порядков дифракции регистрируются фотоприёмными устройствами (ФПУ).

Рассмотрим особенности этого метода для фазовых рельефов, профиль которых отличается от синусоидального.

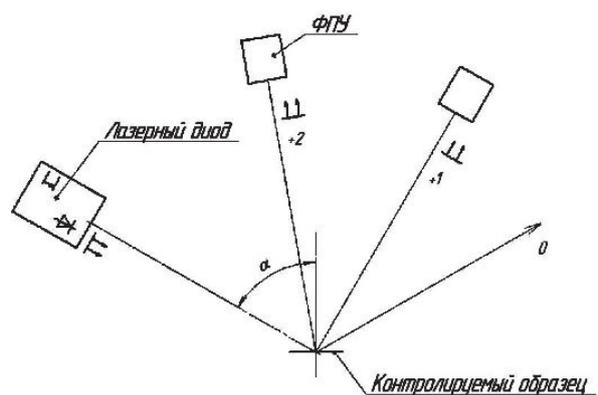
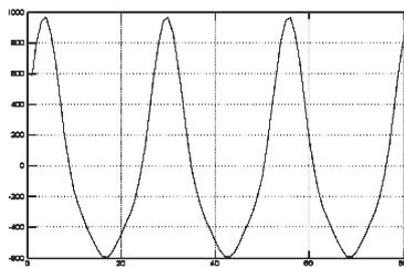
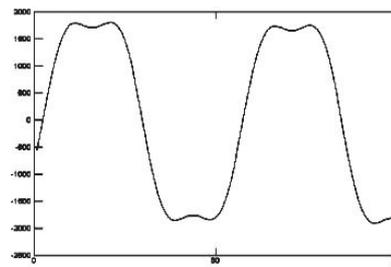


Рисунок 3.
Функциональная схема устройства



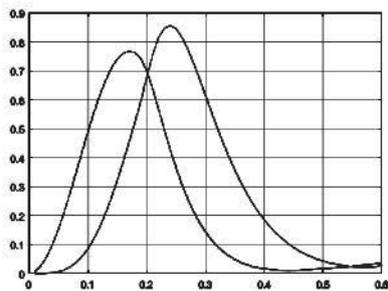
а) «гребенчатого»



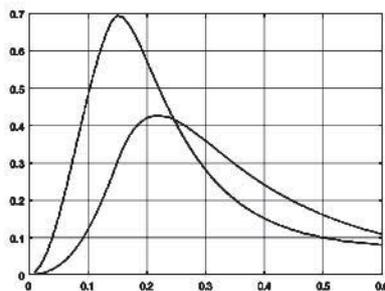
б) «трапецеидального»

Рисунок 4.

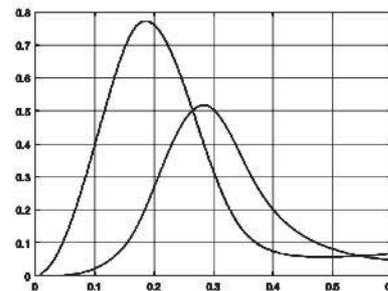
Примеры профилей фазового рельефа ЗГ



а) синус



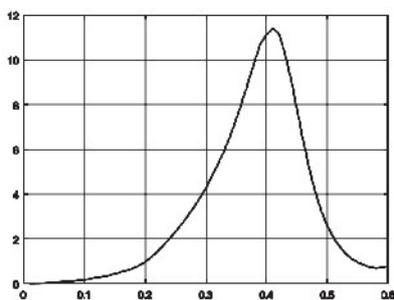
б) гребень



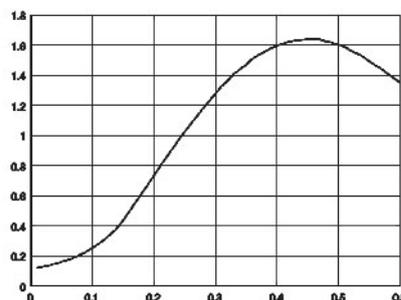
в) трапеция

Рисунок 5.

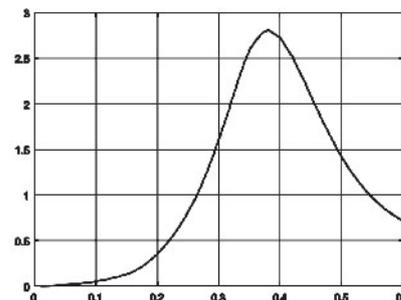
Зависимости интенсивности в 1-ом и 2-ом порядках дифракции от глубины рельефа



а) синус



б) гребень



в) трапеция

Рисунок 6.

Зависимости отношений интенсивностей 2-го и 1-го порядков от глубины рельефа

На рис. 4а и 4б представлены типичные варианты профилей фазовых рельефов ДР ЗГ, полученные усреднением профилей реальных ЗГ, зарегистрированных с помощью атомно-силового микроскопа. Первый профиль условно назван «гребенчатым», второй – «трапецеидальным».

На рис. 5 представлены графики зависимости интенсивности в 1-ом и 2-ом порядках

дифракции от глубины для синусоидального (а), гребенчатого (б) и трапецеидального (в) профилей рельефа ДР с периодом при подсветке излучением с длиной волны 405 нм под углом 60° .

На рис. 6 приведены зависимости отношений интенсивностей 2-го и 1-го порядков от глубины рельефа для трёх соответствующих профилей рельефа.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что для контроля качества изготовления ЗГ можно использовать метод, основанный на косвенных измерениях параметров фазового рельефа. Но для реализации такого метода контроля, необходима априорная информация о виде профиля фазового рельефа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические исследования подтверждают возможность контроля качества защитных голограмм с использованием предложенного метода косвенного измерения параметров фазовых дифракционных решеток. Получены зависимости, устанавливающие связь между параметрами дифракционного распределения и параметрами поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов.

Список литературы:

1. *Бессемельцев В.П.* Контроль качества отражающих голограмм методами конфокальной микроскопии / В.П. Бессемельцев // XI международная конференция Голоэкспо-2014: сборник научных трудов. - 2014. - С. 50-53.
2. *Колючкин В.В.* Метод когерентного контроля глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов / В.В. Колючкин, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одинок, В.Е. Талалаев, И.К. Цыганов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 515-520.
3. *Хорохоров А.М.* Исследование влияния параметров фазовых дифракционных решеток на распределение интенсивности дифрагированного света при формировании цветокодированных изображений / А.М. Хорохоров, А.М. Клишук, И.К. Цыганов, С.Б. Одинок, А.Ф. Ширанков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Сер. Приборостроение. – 2005. – № 4. - С. 13-26.

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ГОЛОГРАММНЫХ СТЕРЕОГРАММ

ЖЕРДЕВ А.Ю., ОДИНОКОВ С.Б., ЛУШНИКОВ Д.С., КАЙТУКОВ Ч.Б.*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*ФГУП «НТЦ «Атлас», Москва

E-mail: odinokov@bmstu.ru

Предложена оптическая схема получения голограммных стереограмм с углом обзора, увеличенным до 120° , основанная на использовании совместно с диффузором дифракционного оптического элемента высокоапертурная дифракционная линза. Описано использование составной голограммной линзы и бинарной зонной пластинки Френеля в качестве высокоапертурной дифракционной линзы. Получены и исследованы образцы высокоапертурных дифракционных линз с относительным отверстием до $1:0,3$. С помощью высокоапертурных дифракционных линз получены образцы голограммных стереограмм.

Ключевые слова: защитные голограммы, голограммные стереограммы, голографический принтер, дифракционные оптические элементы, голографические оптические элементы.

ВВЕДЕНИЕ

Голограммная стереограмма (ГС) — это стереограмма, в которой стереобраз формируется посредством субголограмм, называемых голопикселями [1, 2, 3]. Использование голопикселей в качестве элемента стереограммы позволяет реализовать произвольную зависимость яркости элемента стереограммы от направления наблюдения. Матрица голопикселей составляет голограммную стереограмму. Таким образом голопиксель выполняет функцию селекции стереокадров как в стереограммах на основе линзового раstra эту функцию выполняет линзовый растр, наложенный на специальное полиграфическое изображение или в анаглифической стереографии — анаглифические очки. Оптико-электронная система для получения ГС обычно называют голографическим принтером [11].

Голограммная стереография позволяет получать высококачественные трехмерные и цветные художественные изображения произвольных объектов и сцен. При этом стереограммы в отличие от аналоговых голограмм не ограничены по размеру и не требуют на-

личия объекта в схеме записи. А в отличие от стереограмм на основе линзовых растров могу восстанавливать на порядок больше стереоракурсов (до двух тысяч стереоракурсов на данный момент). Входными данными для получения голограммных стереограмм является компьютерная модель, видеоролик или серия фотоснимков объекта или сцены. ГС могут воспроизводить эффект движения или трансформации объекта.

В первых голографических принтерах для получения голопикселя использовался сильно рассеивающий диффузный экран [1, 5, 6]. Записываемое изображение, выведенное на транспарант, проецируется на диффузный экран. На экране лазерное излучение претерпевает сильное рассеяние, за счёт чего в апертуру получаемого голопикселя попадает излучение от каждой точки экрана, формируя конус сходящихся лучей. Однако голографический принтер на основе диффузного экрана обладает очень высокими энергетическими потерями, а угол обзора ГС ограничен $40\text{--}60^\circ$.

Позже для формирования конуса сходящихся лучей стали использовать высокоа-

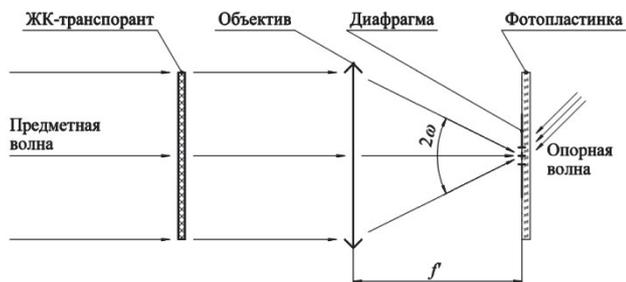


Рисунок 1.

Упрощённая оптическая схема получения голопикселя с линзовым объективом

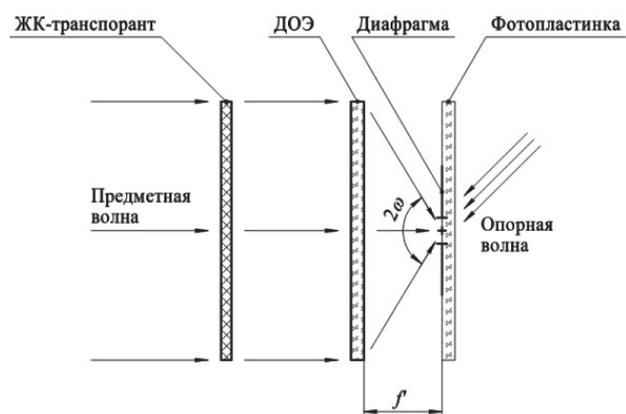


Рисунок 2.

Упрощённая оптическая схема получения голопикселя с ДОО

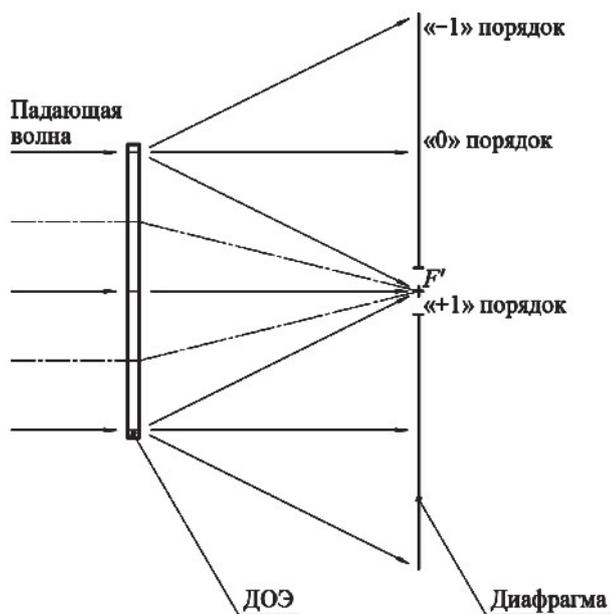


Рисунок 3.

Схема распространения дифракционных порядков ДОО

пертурные линзовые объективы [4, 7]. Пучок лучей, прошедший транспарант, попадает на линзовый объектив, который формирует конус лучей, сходящихся в области получаемого голопикселя, как показано на рис. 1.

Таким обзор угол обзора 2ω изображения, восстанавливаемого ГС, точно определяется удвоенным задним апертурным углом 2σ объектива, использующегося для получения голопикселей, как показано на рисунке 1. Для формирования равномерно светящегося голопикселя линзовый объектив используется совместно со слабо рассеивающим диффузором, расположенным, например, сразу за транспарантом.

Однако ввиду принципиальных ограничений линзовой оптики невозможно получить объектив с задним апертурным углом более, чем $\sigma = 45^\circ$ (а, следовательно, невозможно получить ГС с углом обзора более $2\omega = 90^\circ$). Наиболее распространённые ГС компании Geola обладают максимальным углом обзора 85° [11].

Для достижения более высокого угла обзора предлагается заменить линзовый объектив в голографическом принтере на дифракционный оптический элемент (ДОО), как показано на рис. 2.

Задача ДОО в данной оптической системе заключается в концентрации лучей, падающих и дифрагирующих на ДОО, в область получения голопикселя. Создать линзу Френеля с таким большим относительным отверстием невозможно, поэтому предлагается использовать трёхмерную или двумерную голограмму. С помощью ДОО, угол дифракции излучения на краю которого составляет $\sigma \approx 60^\circ$, возможно создать ГС с углом обзора $2\omega \approx 120^\circ$. Относительное отверстие такого ДОО составит 1:0,3.

Однако ДОО обладают рядом недостатков, проиллюстрированных на рис. 3.

Во-первых, ДОО восстанавливает помимо сходящейся волны «+1» дифракционного порядка, расходящуюся волну «-1» дифракционного порядка и пропускает «0» проходящий порядок. Наличие паразитных дифракционных порядков делает практически

невозможным использование данного ДОЭ в качестве изображающего объектива, однако в голографическом принтере ДОЭ будет использоваться совместно с диафрагмой в области фокуса ДОЭ, которая определяет размер получаемого голопикселя. Данная диафрагма режектирует проходящий и расходящийся дифракционные порядки, нивелируя тем самым их наличие.

Во-вторых, ДОЭ может обладать высокими aberrациями и большой aberrационным пятном рассеяния. Это обстоятельство делает ДОЭ ещё менее пригодным для использования в качестве изображающего объектива. Однако использование ДОЭ в голографическом принтере совместно с диффузором, предназначенным для формирования в области получения голопикселя равномерного поля вместо пятна рассеяния, позволяет нивелировать и этот недостаток ДОЭ.

Таким образом, несмотря на то, что подобный высокочастотный ДОЭ не может использоваться в качестве изображающего объектива, он вполне подходит для использования в голографическом принтере.

Было исследовано два типа ДОЭ высокоапертурной дифракционной линзы: 1) трёхмерный фазовый голограммный оптический элемент составной голограммной линзы и 2) двумерный бинарный амплитудный ДОЭ дифракционной линзы.

СОСТАВНАЯ ГОЛОГРАММНАЯ ЛИНЗА

Трёхмерный фазовый ДОЭ высокоапертурной дифракционной линзы может быть получен только голографическим методом, поэтому является голограммным оптическим элементом (ГОЭ).

Для получения пропускающей голограммной линзы необходимо сформировать и направить на фотопластинку плоскую и расходящуюся сферическую волны. Страты трёхмерной голографической решётки, формирующей ГОЭ ориентированы вдоль оптической оси, поскольку являются результатом интерференции конаправленных волн, и имеют угол с оптической осью в диапазоне от 0° до $\omega/2 = 30^\circ$.

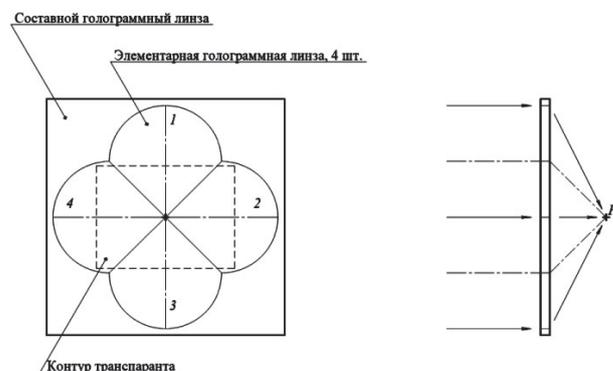


Рисунок 4.

Схема составной голограммной линзы

Сформировать равномерную расходящуюся волну с апертурным углом $\sigma = 60^\circ$ с помощью линзовой оптики невозможно, поэтому трёхмерный ГОЭ был получен как составная голограммная линза (СГЛ), схема которой показана на рис. 4.

ГОЭ состоит из четырёх элементарных голограммных линз, каждая из которых имеет относительное отверстие 1:1 (и задний апертурный угол $\sigma_1 = 30^\circ$, соответственно). При этом элементарные голограммные линзы имеют общий фокус. За счёт этого задний апертурный угол СГЛ составляет $\sigma = 60^\circ$ (и относительное отверстие составляет 1:0,3, соответственно), что делает возможным получение ГС с углом обзора до $2\omega = 120^\circ$.

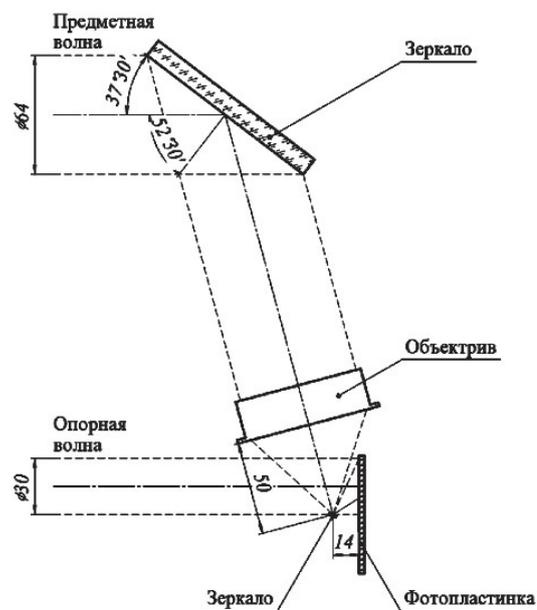


Рисунок 5.

Оптическая схема установки получения составной голограммной линзы

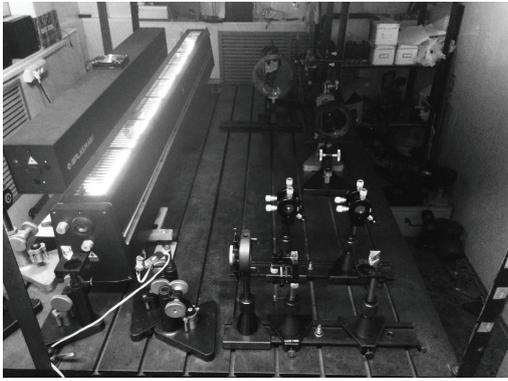


Рисунок 6.
Фотография голографического стенда для получения СГЛ

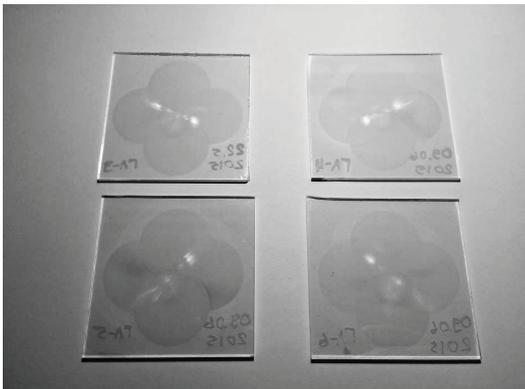


Рисунок 7.
Фотография образцов составной голограммной линзы

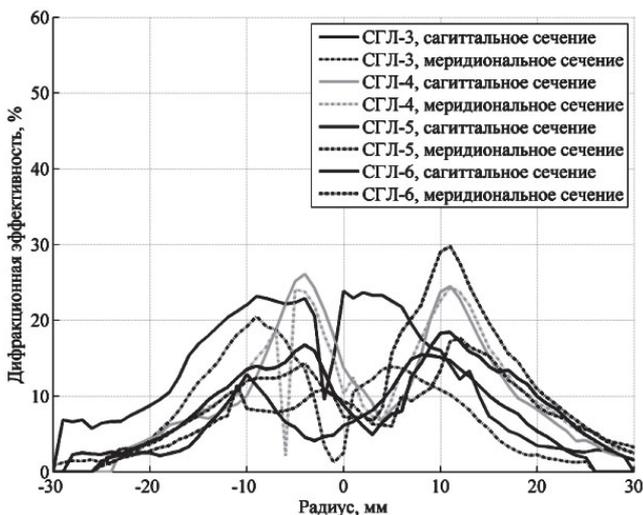


Рисунок 8.
Графики распределения дифракционной эффективности образцов СГЛ в сагитальном и меридиональном сечениях

Для получения такого СГЛ предложена оптическая схема, показанная на рис. 5. В объектной ветви после системы расширения лазерного луча находится большое отклоняющее зеркало, рефракционный объектив для формирования сферической волны и малое отклоняющее зеркало в области фокуса объектива, которое формирует расходящуюся сферическую волну, падающую на зону размером в четверть поверхности фотопластинки.

Сонаправленно объектной волне на эту же зону фотопластинки падает плоская опорная волна. Таким образом это оптическая схема получения голограмм габоровского типа.

В процессе получения СГЛ необходимо сделать четыре экспозиции для получения элементарных вне-осевых голограммных линз на зоне фотопластинки, поворачивая фотопластинку между экспозициями на 90°.

Экспериментальные образцы СГЛ были получены на голографическом стенде, собранном согласно разработанной оптической схеме, показанном на рис. 6.

Фотография полученных образцов представлена на рис. 7. Видно, что все четыре зоны на образцах совместно формируют блик от лампы, освещающей образцы во время съёмки данной фотографии.

Параметры образцов СГЛ приведены в таблице 1. Световой диаметр измерялся по диагонали. Результаты измерения дифракционной эффективности образцов СГЛ по сагитальному и меридиональному сечениям представлены на графике на рис. 8.

Не смотря на падение дифракционной эффективности в центре и на краю апертуры СГЛ, возможно добиться среднего значения дифракционной эффективности на уровне 10–20%.

Таблица 1.
Параметры составного голограммного объектива

Параметр	Значение
Световой диаметр	45 мм
Максимальный диаметр	60 мм
Рабочая длина волны	0,6328 мкм
Фокусное расстояние	15 мм
Относительное отверстие	От 1:0,3
Дифракционная эффективность	До 31%

ДИФРАКЦИОННАЯ ЛИНЗА

Поскольку рельефно-фазовая пропускающая голограмма не может обладать значительной дифракционной эффективностью, в качестве двумерного ДОЭ использовался бинарный амплитудный ДОЭ, полученный на электронно-лучевом литографе, представляющий собой зонную пластинку Френеля.

Параметры дифракционной линзы можно рассчитать с помощью основного уравнения зоны Френеля

$$\frac{f'}{\cos \alpha_n} - f' = \lambda n$$

где λ – длина волны излучения,
 f' – фокусное расстояние,
 n – порядковый номер зоны Френеля,
 α_n – угол дифракции излучения на n -ой зоне Френеля.

Рассчитанные параметры дифракционной линзы с диаметром 46 мм и фокусным расстоянием 13,3 мм, представленные в таблице 2. На основании ширины T_n n -ой зоны была оценена пространственная частота дифракционной решётки в области n -ой зоны как $\nu_n = 1/T_n$.

Расчёт параметров для вышеописанных параметров голограммного объектива позволяет получить следующие величины, перечисленные в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, пространственная частота голографической решётки не превышает 1 400 л/мм.

Образец дифракционной линзы, показанный на рис. 9, был изготовлен при содействии ФГУП «НТЦ «Атлас». ДОЭ был изготовлен точно под размер транспаранта с диагональю 46 мм.

Таблица 2.

Параметры дифракционной линзы

Параметр	Значение
Световой диаметр	46 мм
Фокусное расстояние	13,3 мм
Относительное отверстие	1:0,3
Количество зон N	21 022
Радиус первой зоны R_1 , мкм	129,7
Ширина второй зоны T_2 , мкм	53,7
Ширина последней зоны T_N , мкм	0,731
Частота второй зоны ν_2 , л/мм	18,6
Частота последней зоны ν_N , л/мм	1 369

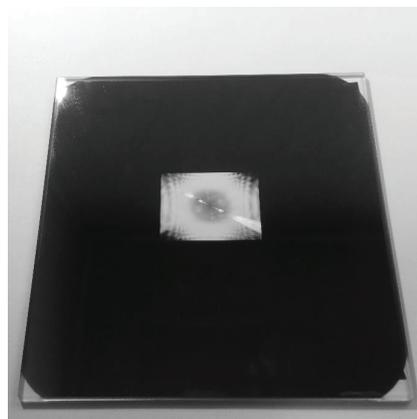


Рисунок 9.

Фотография образца дифракционной линзы

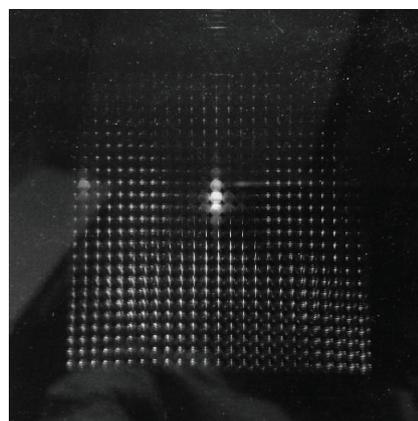


Рисунок 10.

Фотография образца дифракционной линзы

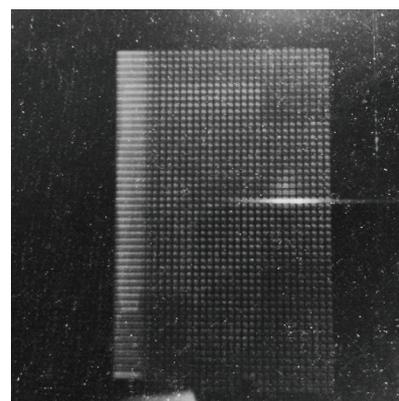


Рисунок 11.

Фотография образца ГС №2, полученной с помощью дифракционной линзы

Основной сложностью в получении дифракционной линзы стал подбор режима работы электронно-лучевого литографа для получения ДОЭ с периодом дифракционной структуры, непрерывно изменяющейся от 0,7 до 50 мкм, а также борьба с эффектом близости (эффектом влияния экспозиции текущей зоны на соседние зоны).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В рамках экспериментальных исследований голографического принтера на основе ДОЭ были получены образцы ГС с помощью составной голограммной линзы (ГС №1) и дифракционной линзы (ГС №2), соответственно. При получении ГС на транспаранте было выведено ровное светлое поле. Размеры ГС не превышают 50×50 мм. Форма голопикселей круглая, диаметр голопикселей составляет 2 мм и 1 мм, соответственно. Фотографии ГС №1 и №2 представлены на рисунках 10 и 11.

Как видно на последних рисунках, внутри голопикселей образца №1 видно абберационное пятно, форма которого зависит от угла наблюдения. Также при наблюдении строго ортогонально голопиксель восстанавливает яркое круглое пятно.

Яркое круглое пятно объясняется прямым пропусканием составной голограммы, прошедшим через диафрагму при получении голопикселя. Поскольку коэффициент пропускания ГОЭ в несколько раз выше дифракционной эффективности в рабочем порядке дифракции, при ортогональном наблюдении происходит сильный скачок яркости голопикселя. Абберационное пятно объясняется селективностью объёмной голограммы, слишком высокой, чтобы совместно с диффузором сформировать равномерно освещённое поле при получении голопикселя.

Внутри голопикселей образца №2 восстанавливается более равномерное поле, поскольку амплитудная дифракционная линза не обладает спектрально-угловой селективностью и совместно с диффузором создаёт равномерно освещённое поле внутри апертуры голопикселя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проведённых исследований стала оптическая схема голографического принтера на основе ДОЭ, которая позволяет получать ГС с углом обзора, увеличенным до 120°. Предложено два типа ДОЭ, позво-

ляющих добиться этой цели: трёхмерный фазовый ГОЭ СГЛ и двумерный бинарный амплитудный ДОЭ дифракционной линзы. Были получены образцы ДОЭ обоих типов с относительным отверстием 1:0,3. Были получены образцы ГС при помощи СГЛ и при помощи дифракционной линзы. Показано, что ввиду отсутствия спектрально-угловой селективности, дифракционная линза совместно со слабо рассеивающим диффузором позволяет получать ГС с более равномерно светящимися голопикселями.

Данная работа была выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства образования и науки России в рамках контракта №14.577.21.0197 (грант RFMEFI57715X0197).

Список литературы

1. De Bitetto D.J. Holographic panoramic stereograms // Applied optics. - 1969. - Том 8. - Номер 8 - С. 1740.
2. King M.C. A new approach to computer-generated holography / M.C. King, A.M. Noll, D.H. Berry // Applied optics. - 1970. - Том 9. - С. 471.
3. Benton S.A. Survey of holographic stereograms // SPIE Conference Proceeding. - 1982. - Том 367. - С. 15.
4. Honda T. Printing of holographic stereogram using liquid-crystal TV / T. Honda, M. Yamaguchi, D. Kang // Applied optics. - 1989. - Том 1051. - С. 186.
5. Halle M.W. The ultragram. A generalized holographic stereogram / M.W. Halle, S.A. Benton, M.A. Klug // SPIE Conference Proceeding. - 1991. - Том 1461.
6. Spierings W. Calculating the right perspectives for multiple photo generated holograms / W. Spierings, E. van Nuland // SPIE Conference Proceeding. - 1991. - Том 1600. - С. 96.
7. Klug M.A. A compact prototype one-step Ultragram printer / M.A. Klug, M.W. Halle, M. Lucente, W.J. Plesniak // SPIE Conference Proceeding. - 1993. - Том 1914. - С. 15.
8. Патент US4834476 Real image holographic stereograms / Stephan A. Benton (США); опубл. 30.05.1989.
9. Патент US6559983 Holographic stereogram printing system, holographic stereogram printing method and holographic device / Takahiro Toyoda (Япония); опубл. 06.05.2003.
10. Патент US7057779 Holographic stereogram device / Wai-Hon Lee (США); опубл. 06.01.2005.
11. Патент US6930811 Holographic printer / David Brotherton-Ratcliffe (США); опубл. 16.08.2005.

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДЛЯ ОДНОЭТАПНОГО ПОЛУЧЕНИЯ ЦВЕТНЫХ СОВМЕЩЁННЫХ ГОЛОГРАММНЫХ СТЕРЕОГРАММ

ЖЕРДЕВ А.Ю., ЛУШНИКОВ Д.С., МАРКИН В.В., ОДИНОКОВ С.Б., СМИРНОВ А.В.*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*АО «НПО «Криптен», Дубна,

E-mail: odinokov@bmstu.ru

Рассматривается аппаратура записи голограммных стереограмм. Реализован метод одноэтапной цифровой записи цветных полнопараллаксных голограммных стереограмм с формированием в плоскости голограммы безрастрового изображения. Аппаратура реализована в варианте записи защитных голографических стереограмм.

Ключевые слова: защитные голограммы; цветные голограммы; мультиплексные голограммы; голограммные стереограммы.

Голограммная стереограмма (ГС) представляет тип голограммы, формирующей при восстановлении массив наложенных двухмерных изображений объекта, каждое из которых является изображением, наблюдаемым с определенного направления, или ракурса. При рассмотрении такого много-ракурсного изображения глаза наблюдателя видят два различных ракурса изображения, что создает эффект наблюдения объемного изображения объекта. При смещении наблюдателя в зоне формирования ракурсов пары наблюдаемых ракурсных изображений меняются, и наблюдается поворот объекта. При записи однопараллаксных голограмм этот поворот наблюдается только в одной, как правило, горизонтальной плоскости. Полнопараллаксные голограммы создают эффект поворота в обеих плоскостях, горизонтальной и вертикальной.

Современные высокопроизводительные системы записи ГС являются цифровыми, использующими в предметном пучке ЖК-дисплей с компьютерным последовательным вводом записываемых изображений. Широко распространенными голографическими системами записи стереограмм яв-

ляются одноэтапные растровые системы. В растровых голографических системах, называемых иногда голографическими принтерами, голограмма и, соответственно, изображение объекта формируется в виде одномерного растра, при записи однопараллаксных стереограмм [1, 2], или двухмерного растра, при записи полнопараллаксных голограмм [3]. В таких системах каждый элемент растра на голограмме обеспечивает восстановление всего набора ракурсов для записываемого элемента изображения объекта. Запись одного такого элемента, представляет регистрацию в фоточувствительной среде поля интерференции опорного и предметного пучков, а предметный пучок при этом должен нести в виде пространственно разделенных субпучков информацию обо всех ракурсах регистрируемого элемента изображения. Соответственно и само выводимое на ЖК-дисплей в предметном пучке изображение не может быть просто изображением объекта в одном определенном ракурсе, а представлять сложное, компьютерно-синтезированное по определенному алгоритму изображение. Это требует при записи стереограммы дополнительной

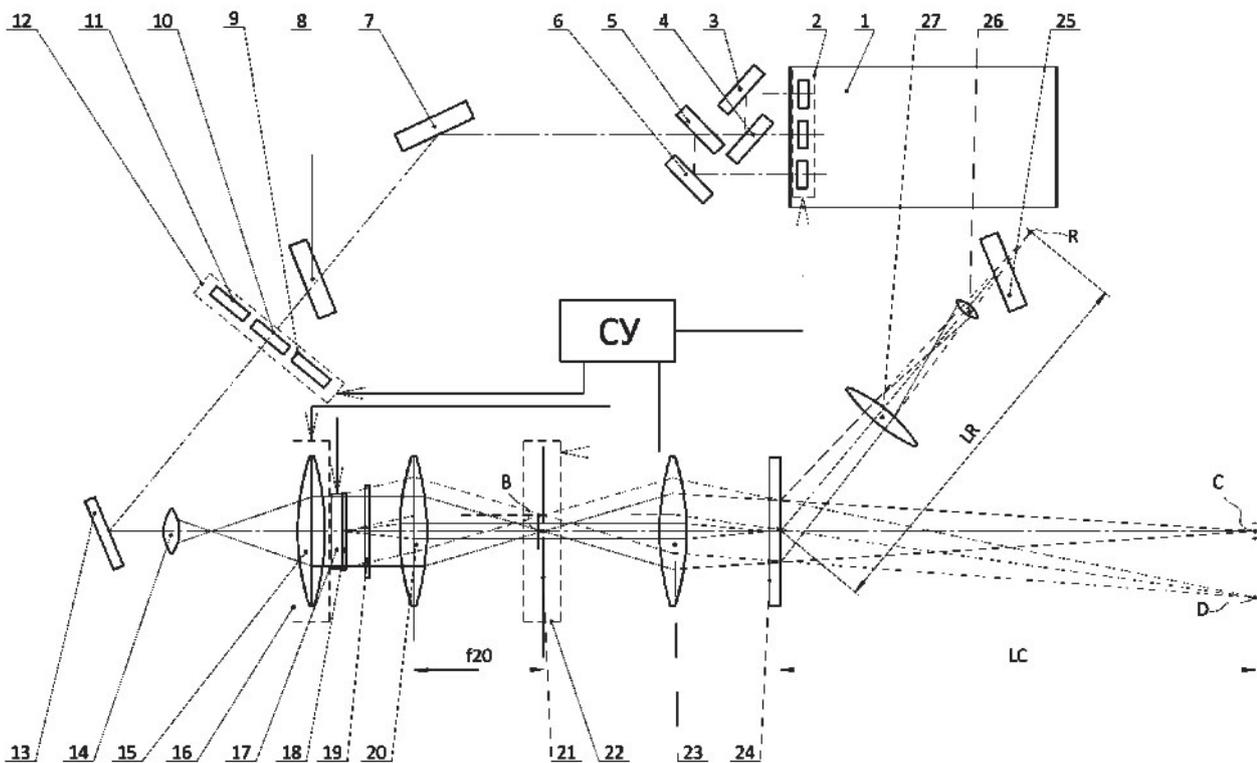


Рисунок 1.

Оптическая схема для получения ГС, реализующая одноэтапную цифровую запись цветных ГС с формированием в плоскости голограммы безрастрового изображения

предварительной обработки ракурсных изображений и усложняет аппаратуру записи.

В аппаратуре такого типа очевидным является требование минимизации размеров элемента растра на голограмме до размеров, при которых этот элемент растра не разрешается глазом с расстояния наблюдения голограммы. При нормальном разрешении глаза в одну угловую минуту и при рассмотрении голограммы с расстояния в 400 мм, размер элемента растра не должен превышать 0,1 мм. Получить элемент растра с такими размерами только с помощью установленной перед регистрирующей средой диафрагмой или щелью проблематично и достигается усложнением оптической схемы аппаратуры.

Необходимо кроме того иметь в виду ухудшение качества восстановленного изображения из-за рассеяния излучения на растровой структуре голограммы, а также то, что растровый характер изображения не позволяет включать в изображения

мелкоструктурные защитные элементы, например, микротекстовые или френелевские элементы.

Запись полноцветных ГС предполагает использование в аппаратуре лазерной системы, генерирующей излучение на красной, зеленой и синей длинах волн. В системах записи растровых ГС при этом осуществляется либо мультиплексная запись элемента растра на различных длинах волн [3, 4], либо параллельная запись элементов растра на различных длинах волн [5]. Вариант аппаратуры с мультиплексной записью, требующий объединения пучков трех длин волн в одном канале, сопровождается повышением требований к оптической системе и из-за этого ее усложнением, а также падением дифракционной эффективности ГС вследствие мультиплексирования. Вариант аппаратуры с параллельной записью сопровождается ее громоздкостью.

Все отмеченные выше недостатки растровых систем, привели к созданию прин-

ципиально отличающейся системы записи ГС, особенно имеющей преимущества при записи защитных стереограмм, когда нет необходимости в получении голограмм больших размеров, но требуется повышенное качество изображения для обеспечения возможности включения в изображение мелкоструктурных защитных элементов, как это отмечалось выше. Оптическая схема разработанной системы записи ГС, реализующей одноэтапную, цифровую запись цветных полнопараллаксных голограмм с формированием в плоскости голограммы безрастрового изображения, представлена на виде сверху (в горизонтальном сечении) на рис. 1. Здесь представлена система в варианте записи отражающих ГС.

Излучение твердотельного импульсного лазера 1 (Geola RGB Alfa A1), дающего три отдельных пучка с длинами волн 440, 532 и 660 нм, с помощью системы дихроичных зеркал 3–6 объединяется в единый пучок. В состав лазера входит блок затворов 2, открываемых на время экспозиции от общей системы управления (СУ), а также полуволновые пластинки в каждом из пучков, обеспечивающие необходимую ориентацию плоскости поляризации. В данной системе устанавливается вертикальная плоскость колебаний электрического вектора. После отражения зеркалом 7 объединенный пучок излучения с помощью полупрозрачного зеркала 8 делится на два пучка: предметный (ПП) и опорный (ОП).

При экспонировании на определенной длине волны, которое на каждой из них осуществляется последовательно, в ход ПП устанавливается соответствующая полуволновая пластинка 9, 10 или 11, переводящая колебание электрического вектора в горизонтальную плоскость. Смена пластинок осуществляется устройством смещения 12, управляемым от СУ.

После отражения ПП от зеркала 13 телескопическая система линз 14 и 15 форми-

рует коллимированный пучок с размерами, необходимыми для равномерной засветки рабочего окна жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света (ПВМС) 17. Основная функциональная часть оптической системы ПП, включающая представленные на рис. 1 элементы 15–24, обеспечивает последовательный ввод на ПВМС от СУ регистрируемых ракурсов изображений и проекционный перенос помощью объективов 20 и 23 этих изображений в плоскость регистрирующей среды 24.

За ПВМС в непосредственном с ним контакте помещается диффузор 18 и далее по ходу лучей анализатор 19. Анализатор пропускает излучение с вертикальной ориентацией электрического вектора и обеспечивает максимальный контраст наблюдаемого за ПВМС изображения. В задней фокальной плоскости объектива 20 установлена диафрагма 21. В этой плоскости формируется пространственно-частотный спектр (ПЧС) поля излучения за ПВМС, сложный по структуре и протяженный по размерам в связи со сложной и тонкой структурой ПВМС. Диафрагма 21, вырезает центральную информативную часть спектра и играет таким образом роль пространственного фильтра.

В целом пучок излучения за объективом 23, формирующим изображение на регистрирующей среде, является пучком, сходящимся в некоторой точке на определенном расстоянии за регистрирующей средой. Это расстояние соответствует расстоянию, с которого производится наблюдение изображения на голограмме при его восстановлении. В рассматриваемой реализации аппаратуры — это расстояние составляет 400 мм. На рис. 1 сплошными линиями представлен ход лучей в ПП при записи центрального (осевого) ракурса, сходящихся за регистрирующей средой в точке С на оси системы. Из хода лучей видим, что центр пучка, выделяемого диафрагмой 21 (точка В), и центр

пучка, сходящегося за регистрирующей средой 23 (точка С), являются оптически сопряженными. Использование диффузора 18 обеспечивает размытие центрального максимума ПЧС в пределах апертуры диафрагмы 21 и, тем самым, выравнивает распределение интенсивности излучения в области схождения ПП за регистрирующей средой.

Смена изображений, вводимых на ПВМС, сопровождается поперечным смещением линзы 15 с помощью механизма перемещения 16. Это обеспечивает изменение направления пучка излучения, падающего на ЖК ПВМС и объектив 20, и, соответственно, изменение направления пучка излучения, формирующего изображение на регистрирующей среде за объективом 23. В связи со смещением при этом ПЧС в фокальной плоскости объектива 20 производится соответствующее перемещение фильтрующей диафрагмы 21 с помощью механизма перемещения 22. При этом смещается в поперечном направлении и точка схождения ПП за регистрирующей средой (из точки С в точку D). Ход лучей, формирующих изображение в плоскости регистрирующей среды 24 при вводе на ПВМС произвольного ракурса изображения объекта и соответствующем смещении линзы 15, на рис. 1 представлен пунктирными линиями.

После отражения от полупрозрачного зеркала 8 лазерное излучение в ветви опорного канала зеркалом 25 отражается в направлении регистрирующей среды 24. ОП, падающий на регистрирующую среду, с помощью линз 26 и 27 формируется в гомоцентрический расходящийся пучок с центром расхождения R, отстоящим от регистрирующей среды на расстояние 1 м. Это расстояние соответствует расстоянию, на котором располагается восстанавливающий источник излучения при рассмотрении ГС. В рассматриваемой реализации системы, предназначенной для записи защитных ГС, имеющих относительно небольшие размеры (порядка

нескольких см) и рассматриваемых с не большого расстояния, принятого выше равным 400 мм, восстанавливающий источник излучения находится также на относительно небольшом расстоянии от голограммы. Принимаем здесь это расстояние равным 500 мм. Угол падения ОП на регистрирующую среду составляет примерно 45° .

В процессе единичного экспонирования в фоточувствительной среде регистрируется поле интерференции ОП и ПП, где последний формирует в этой среде изображение объекта в определенном ракурсе на одной из трех длин волн. Полный цикл записи ГС включает последовательную регистрацию всего набора ракурсов на каждой длине волны, в результате чего ГС является мультиплексной. Совокупность всех точек схождения ПП за регистрирующей средой на расстоянии от нее образует виртуальную двухмерную регулярную решетку.

При рассмотрении записанной ГС сама голограмма, восстанавливающий источник излучения и наблюдатель располагаются в одной вертикальной плоскости. При этом их относительное положение должно соответствовать относительному положению регистрирующей среды, центра R гомоцентрического ОП и точки С схождения ПП на стадии записи ГС, которые на рис. 1 располагаются в плоскости рисунка. В области расположения глаз наблюдателя восстанавливается действительное изображение указанной выше двухмерной регулярной решетки, откуда следуют требования к ее параметрам на стадии записи. Так шаг этой решетки не должен превышать диаметр зрачка наблюдателя (2–3 мм). Общий размер решетки в одном направлении, соответствующем направлению линии, соединяющей глаза наблюдателя (направление, перпендикулярное плоскости рис. 1), должен существенно превышать величину базы глаз, равную примерно 60 мм. Размер этой решетки в другом направлении, перпенди-

кулярном первом, должен быть достаточным для обеспечения эффекта поворота рассматриваемого объекта при качании головы в вертикальной плоскости и может быть несколько меньшим.

При значительном числе последовательных экспонирований фоточувствительного материала, равному произведению количества ракурсов для записываемого объекта на число цветовых компонентов, такая мультиплексная запись всегда приводит к существенному снижению дифракционной эффективности в восстановленном изображении как отдельного ракурса или его цветового компонента, так и всей ГС. Для некоторых фоточувствительных сред, например, для фотополимеров, данный способ экспонирования фоточувствительного слоя принципиально не подходит, что связано с образованием и записью действительной интерференционной картины после каждого экспонирования и дифракцией излучения на структуре этой картины при последующих экспозициях.

В отношении рассмотренной выше оптической схемы аппаратуры для записи полнопараллаксных ГС заметим, что она может быть использована и при записи однопараллаксных ГС с обеспечением эффекта стереоскопического восприятия в одной горизонтальной плоскости. При этом для обеспечения достаточного угла обзора ГС в вертикальном направлении должен использоваться диффузор 18 с широкой индикатрисой рассеяния в соответствующем направлении,

на рис. 1 совпадающем с плоскостью рисунка, а диафрагма 21 должна быть щелевой.

Кроме того, аппаратура может быть представлена в варианте записи пропускающих ГС. Для этого часть системы ОП в составе элементов 26, 27, формирующая его геометрию в области регистрирующей среды 24, должна быть симметрично развернута в плоскости рисунка относительно плоскости регистрирующей среды.

Данная работа была выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства образования и науки России в рамках контракта №14.577.21.0197 (грант RFMEFI57715X0197).

Список литературы:

1. *Nobuhiro Kihara*. Holographic stereogram forming apparatus // Патент US 7046409 B2 / (Япония); Оpubл. 16.05.2006.
2. *Takahiro Toyoda*. Holographic stereogram printing system, holographic stereogram printing method and holographic device // Патент US6559983 / (Япония); Оpubл. 06.05.2003.
3. *Michael Klug, Mark Holzbach, Alejandro Ferdman*. Method and apparatus for recording one-step, full-color, full-parallax, holographic stereograms // Патент US6630088 B1 / (США); Оpubл. 11.12.2001.
4. *David Brotherton-Ratcliffe*. Holographic printer // Патент US6930811 / (США); Оpubл. 16.08.2005.
5. *David Brotherton-Ratcliffe*. Holographic printer // Патент US7161722 / (США); Оpubл. 09.01.2007.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГОЛОГРАММНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЮСТИРОВКИ ВНЕОСЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ДОРОШИНА Ю.П.*, НАСЫРОВ Р.К.** , ОДИНОКОВ С.Б.***, ПОЛЕЩУК А.Г.** , СЕНИК Б.Н.*

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

** Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

*** МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: bogdan_senik@mail.ru

В статье приводятся результаты аналитического поиска в мировых технических изданиях и публикациях вопроса применение синтезированных голограмм для сборки, юстировки оптико-электронных комплексов мониторинга космического пространства. Рассмотрены конструктивные подходы к созданию оптических трактов для оптико-электронной аппаратуры малых космических аппаратов.

Представлена краткая информация о выполненной НИОКР по созданию широкоспектральной аппаратуры среднего разрешения предприятием ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева», совместно с НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана и Институтом автоматики и электрометрии СО РАН.

Ключевые слова: синтезированная голограмма, оптико-электронное приборостроение, сборка и юстировка.

В настоящее время голография, как важнейшая и неотъемлемая часть фундаментальной и прикладной оптики, приобретает повышенную актуальность.

Голографические элементы и приборы на их основе всё активнее внедряются в различные направления деятельности общества, постоянно расширяется поле их практического применения.

Регулярно проводимые конференции «ГолоЭкспо», несомненно, способствуют активизации деятельности как отдельных учёных, так и профильных предприятий и организаций в плане внедрения инновационных решений в этой области, практических подходов к решению целого ряда научных и технических задач с использованием голографических элементов, открывая новые горизонты развития голографии, как науки.

Оптико-электронное приборостроение по праву является приоритетным направлением научно-технического прогресса и в последние годы бурно развивается по многим направлениям. Успехи в голографии напрямую влияют на многие технологические и конструкторские переделы в этой области.

Аналитический обзор отечественной и зарубежной профильной литературы показал, что с помощью синтезированных голограмм в оптико-электронном приборостроении решаются следующие задачи:

– аттестационный контроль осесимметричных, сегментированных, сферических, асферических оптических элементов различных габаритов для использования во всех существующих спектральных диапазонах, с высочайшей точностью ($RMS \leq 1/80$);

– контроль анаморфотных оптических элементов (с цилиндрическими и тороидальными поверхностями);

– технологический контроль центрирования и контроль углов наклона линз при автоколлимационной вточке и сборке оптических модулей;

– использование голографических элементов в оптических схемах изделий с целью повышения выходных оптических параметров и сокращения массо-габаритных характеристик.

Особую актуальность голографические элементы приобретают при их использовании в технологиях сборки и юстировки многокомпонентных линзовых, зеркальных

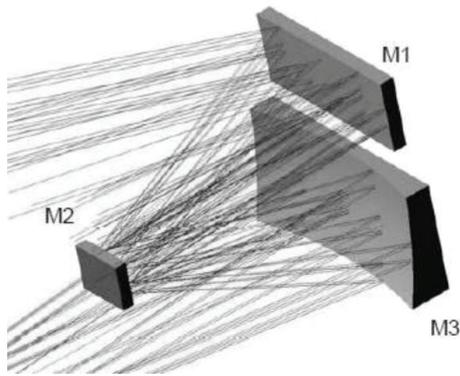


Рисунок 1.

Оптическая схема телескопа

и зеркально-линзовых систем, в том числе крупногабаритных телескопических оптических систем наземного и космического базирования. В зарубежных информационных источниках по вышеуказанной теме освещаются результаты сборки, настройки и проведения испытаний различных телескопов.

В частности, бельгийская фирма «AMOS Англе» информирует о создании спутника Sentinel-2 ЕКА (Европейское космическое агентство), спроектированного компанией «EADS Astrium», который применяется для спектральной съемки Земли в высоком разрешении для глобального мониторинга окружающей среды [1]. Процесс настройки телескопа с использованием синтезированных голограмм обеспечил требуемые оптические характеристики — не менее 90 нм среднеквадратического искажения волнового фронта в пределах поля зрения телескопа (см. рис. 1).

Специалисты университета из штата Аризона, США, сообщают о работе, в которой

синтезированные компьютерные голограммы используются для настройки траектории пучков, прошедших через оптическую систему, на расстояниях нескольких метров с минимальной погрешностью и обратной связью в реальном масштабе времени. Вышеуказанные голограммы создают синхронные трёхмерные оптические эталоны, которые не привязаны к поверхностям оптических элементов, обеспечивая эффективную и точную настройку даже для недостаточно хорошо отъюстированных систем. Синтезированная компьютерная голограмма представляет собой зонные пластинки Френеля, в которых отражение нулевого порядка задает отклонение, а преломление первого порядка задает центрирование. Гибкость структуры голограмм можно использовать для их применения в большой номенклатуре оптических, а также для повышения точности их юстировки [2].

В настоящее время в мире создаются сверхгабаритные телескопы наземного базирования с диаметрами головного зеркала свыше 30 м, состоящего из определенного количества сегментированных составных частей (см. рис. 2, 3, 4). Основу сборки и юстировки как головного зеркала, так и телескопа в целом составляют синтезированные голограммы.

Особую актуальность в оптическом приборостроении приобретает космическая аппаратура для различного применения. Дистанционное зондирование Земли является одним из самых приоритетных направлений космической деятельности в Российской Фе-

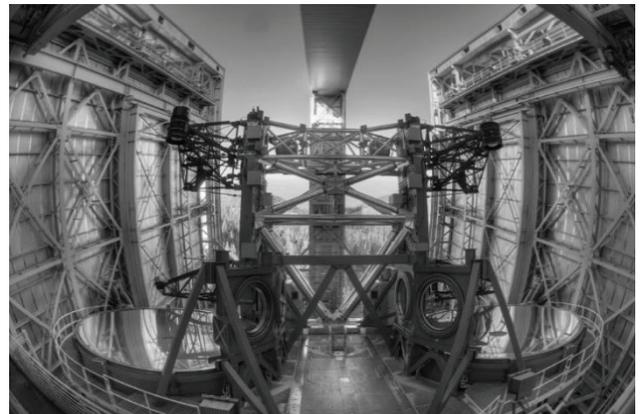
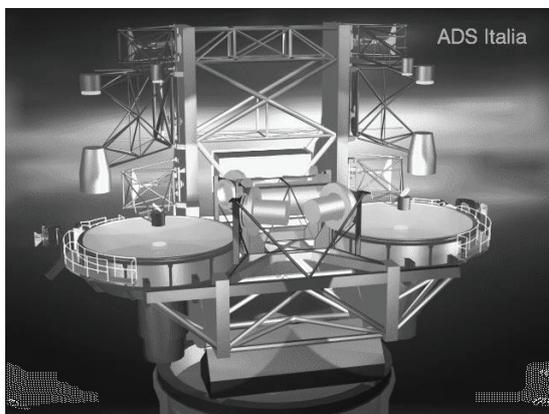


Рисунок 2.

Самый современный большой бинокулярный телескоп, состоящий из двух 8,4-метровых оптических трактов



Рисунок 3.

Тридцатиметровый телескоп, созданный под руководством Университета штата Калифорния, известен как экстремально большой телескоп (главное и вторичное зеркала состоят из отдельных сегментов, отъюстированных с использованием синтезированных голограмм)

дерации. В последние годы в нашей стране и за рубежом в практику дистанционного зондирования Земли активно внедряются технологии гиперспектральной съемки.

Преимуществом гиперспектральной съемки над остальными видами съемок из космоса является формирование двумерного пространственного изображения одного и того же объекта одновременно во множестве узких спектральных диапазонов, что дает возможность наряду с видовой информацией получать данные для спектрального анализа снимаемых объектов. Гиперспектральная съемка Земли и последующий анализ получаемых изображений позволяют эффективно решать важные задачи в таких областях как, разведка месторождений, геология, лесное и сельское хозяйство, охрана окружающей среды, гидрометеорология, анализ техногенных явлений, военная разведка и других [3].

Видимое преимущество по ряду направлений космической деятельности, в том числе ДЗЗ, получило развитие в создании малых космических аппаратов. Данное поколение космических аппаратов предъявляет предельно жесткие требования к аппаратуре по массо-габаритным характеристикам, особенностям конструкциям и надежности. В результате начавшегося и интенсивно продолжающегося процесса миниатюризации

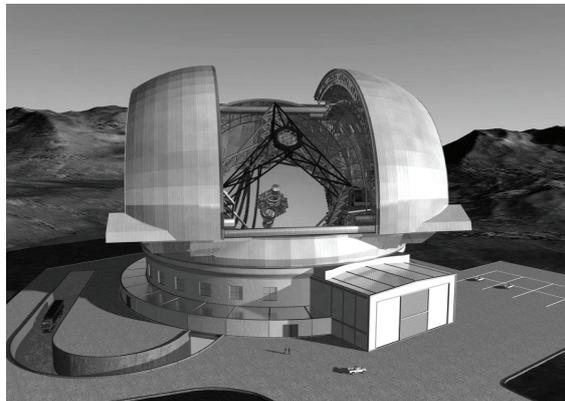


Рисунок 4.

Европейский максимально большой телескоп, создаётся под руководством Европейской Южной Обсерватории (диаметр сегментированного головного зеркала 39 м)

современной гиперспектральной аппаратуры были разработаны новые оптические системы, которые зачастую имеют сложную сегментированную конструкцию нетрадиционных оптических элементов.

Требования к перспективным оптико-электронным системам космического назначения весьма противоречивы. С одной стороны, требуется увеличивать светосилу и поля зрения оптического тракта, что, при сохранении или увеличении прочих характеристик, прежде всего фокусного расстояния, приводит к необходимости увеличения диаметров оптических компонентов и, как следствие, к увеличению их массы. С другой стороны, требуется повышать характеристики оптической системы, расширять области ее применения, снижать затраты на ее изготовление и эксплуатацию, а следовательно уменьшать ее массу. Ключ к разрешению противоречия – создание новых широкоугольных, зеркальных, зеркально-линзовых малокомпонентных оптических систем, обеспечивающих существенное снижение массы аппаратуры, что позволит создать принципиально новый класс перспективных мало-массогабаритных космических систем видового наблюдения.

Оптические системы с эксцентрически расположенным относительно оптической оси полем изображения позволяют существенно

увеличить угловое поле. Отсутствие центрального экранирования позволяет, в сравнении с классическими осесимметричными схемами обеспечить более равномерное по полю качество изображения. В эксцентрической схеме триплета Кука поле изображения расположено на некотором расстоянии относительно оптической оси и имеет кольцевую форму (см. рис. 5). Изображение формируется только наклонными пучками лучей. Из-за отсутствия симметрии поля относительно оптической оси, дополнительно возможно использовать в качестве коррекционного параметра, улучшающего качество изображения, подвижку зеркал, нарушая при этом центровку объектива.

Основная проблема при создании такой аппаратуры состоит в сложности изготовления высокоточных сегментированных сферических, асферических элементов, а также в отсутствии серийно отработанных методик сборки и юстировки внеосевых оптических систем.

В настоящее время в целом ряде оптических предприятий Российской Федерации и за рубежом серийно отработаны технологии сборки и юстировки внеосевых зеркальных телескопических систем, с использованием прецизионных внеосевых асферических зеркал. Данный вид оптических систем, как правило, предназначен для функционирования оптико-электронного комплекса космического назначения в рабочем спектральном диапазоне от 400 нм до 900 нм.

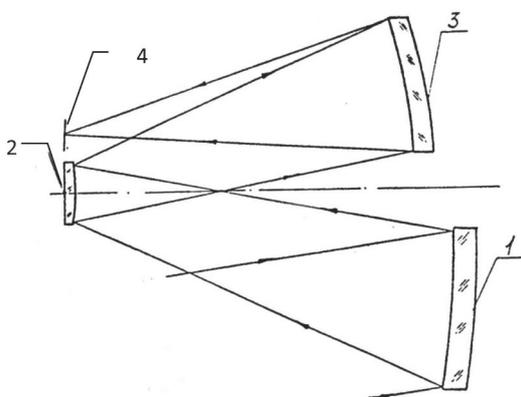


Рисунок 5.

Эксцентричный объектив триплет Кука:
1, 2, 3 – зеркала по ходу светового потока,
4 – плоскость изображения

Современные тенденции в космическом оптико-электронном приборостроении направлены на создание мультиспектральных оптических изделий, работающих одновременно как в видимом, так и в ИК-диапазонах. Для создания аппаратуры, работающей в ИК-диапазоне, как правило, используются рефрактометрические оптические системы на основе линзовых оптических элементов. Учитывая жесткие требования по массогабаритным характеристикам, отработаны схемные решения по использованию сегментированных сферических оптических элементов в оптических трактах ИК-диапазона.

В рамках выполнения НИОКР по созданию широкоспектральной аппаратуры среднего разрешения предприятием ПАО «КМЗ», совместно с НИИ РЛ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана и Институтом автоматики и телеметрии СО РАН выполнены работы по созданию технологии сборки, юстировки и контроля коротковолнового ИК-канала объектива среднего разрешения, работающего в спектральном диапазоне (1,5 – 1,7) мкм. Оптическая схема коротковолнового ИК-канала объектива среднего разрешения представлена на рис. 6. В соответствии с рисунком 6 в состав схемы входят следующие детали и сборочные единицы (по ходу рисунка):

- зеркало гиперболическое;
- блок светоделителя;
- блок линзовый коротковолнового ИК-канала.

Процесс сборки и юстировки коротковолнового ИК-канала объектива среднего разрешения включает следующую последовательность операций:

- сборка и юстировка блока линзового коротковолнового ИК-канала;
- установка и юстировка гиперболического зеркала;
- установки и юстировка блока линзового коротковолнового ИК-канала;
- установка светоделителя.

Важной составляющей комплексной технологии в данной работе является отработка технологии изготовления сегментированных линз (см. рис. 7, 8). Сама по себе задача изго-

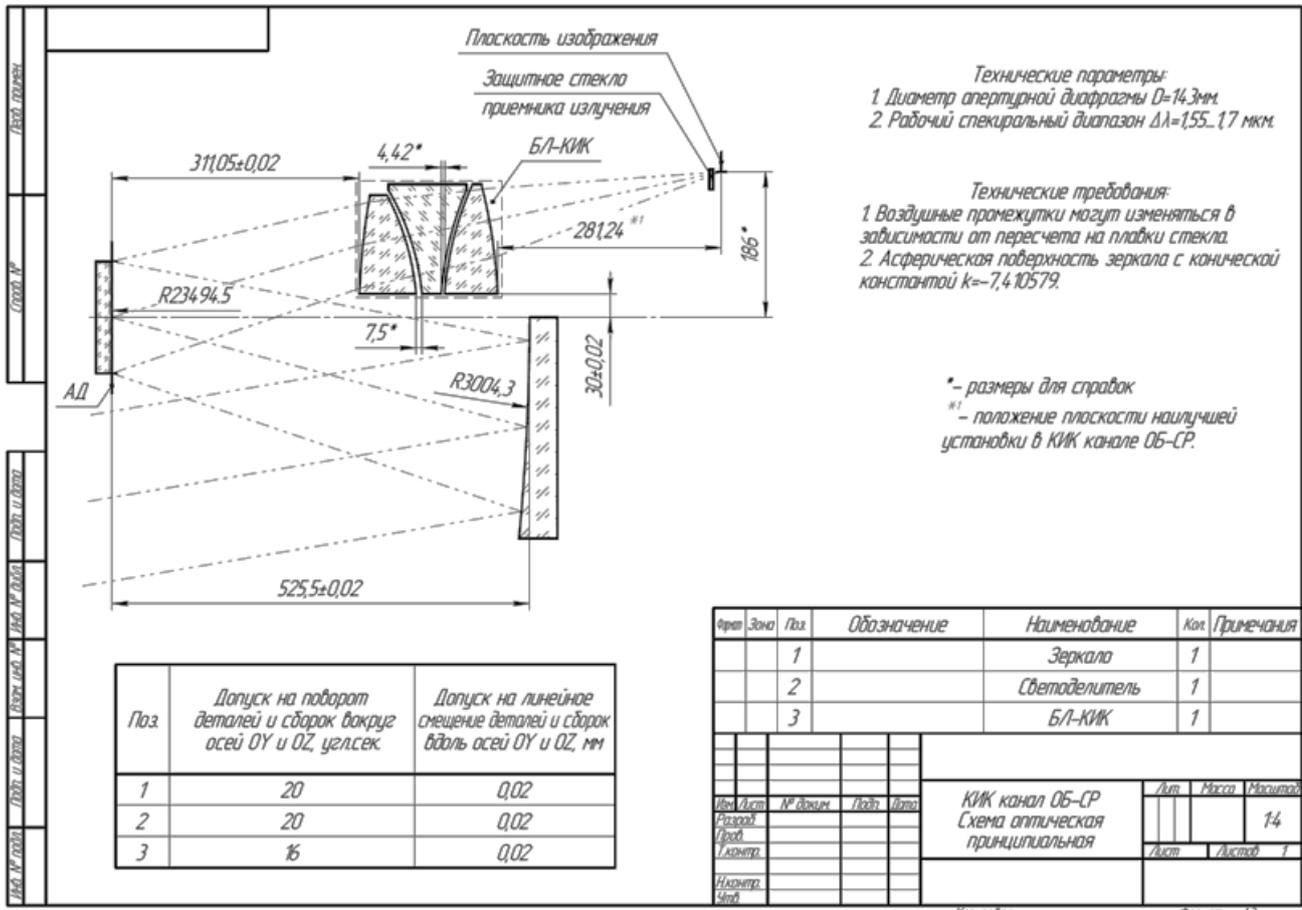


Рисунок 6.
 Схема оптическая КИК канала ОБ-СР

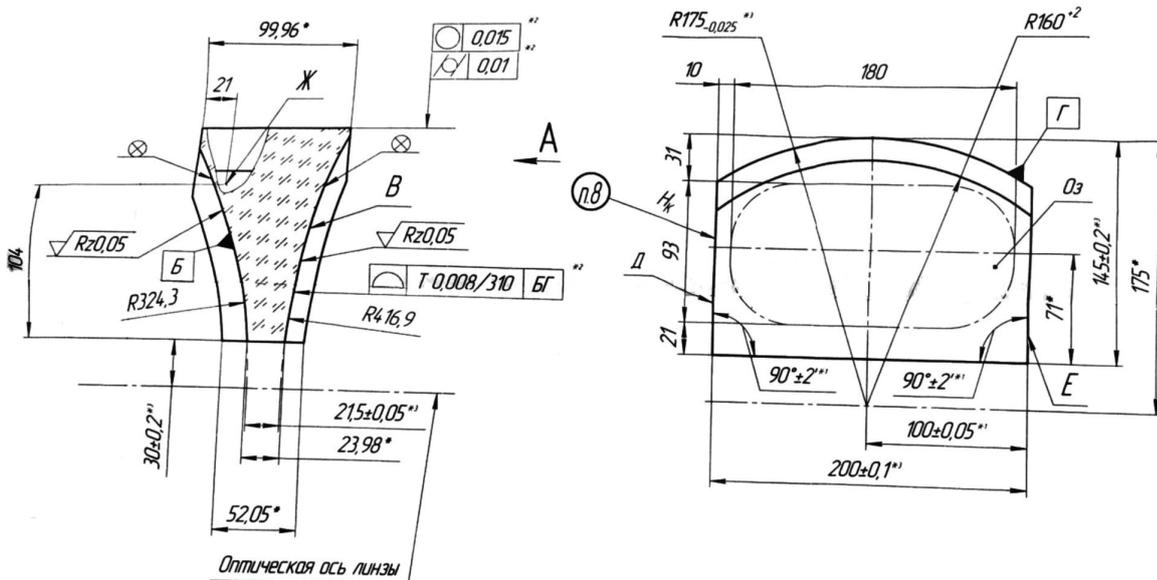


Рисунок 7.
 Сегментированная двояковогнутая линза

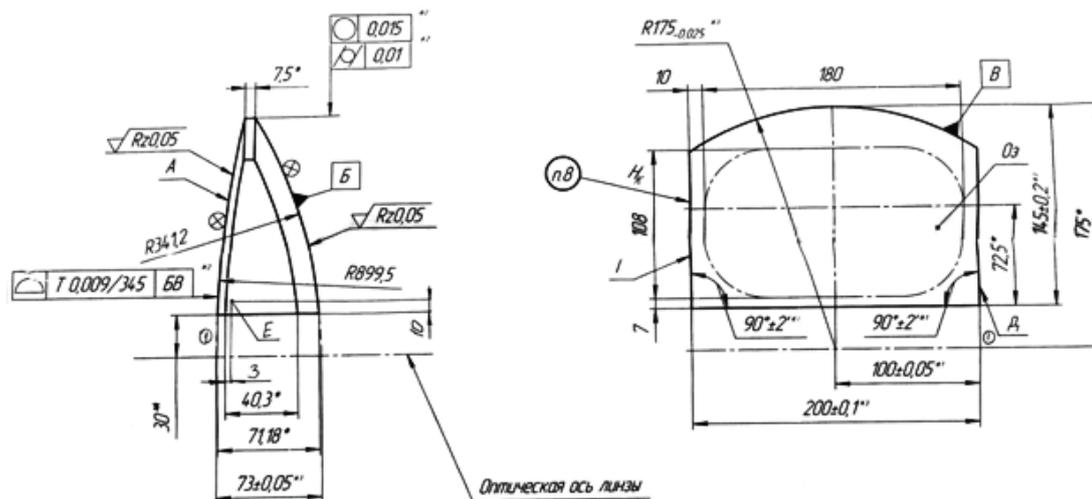


Рисунок 8.

Сегментированная двояковыпуклая линза

товления такого класса оптических элементов является нетривиальной и потребовала от специалистов предприятия ПАО «КМЗ» выполнения большого объема работ по оптимизации данной технологии. В настоящее время эта работа завершена и является интеллектуальной собственностью фирмы.

Отработка технологии сборки и юстировки блока линзового коротковолнового ИК-канала должна была обеспечить выполнение следующих требований:

- допуск на взаимное положение деталей вдоль оптической оси (ось OX) не более 0,02 мм;
- допуск на линейные смещения деталей вдоль осей, перпендикулярных оптической оси (оси OY и OZ), не более 0,02 мм;
- допуск на поворот деталей вокруг осей OY и OZ не более 20 угл.секунд.

Работа является инновационной и выполнена впервые в Российской Федерации, должна иметь продолжение в различных направлениях создания оптико-электронных приборов и комплексов.

Выполнение данной работы потребовало использования многозональных синтезированных голограмм, создания специального стенда для сборки и юстировки данного канала, а также разработки специальной методики.

Данная работа завершена с положительным результатом и является примером успешного взаимодействия одного из институтов Академии наук Российской Федерации — Института автоматики и телетриии СО РАН,

ведущего в стране технического Университета — МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также традиционного разработчика и изготовителя оптико-электронных приборов и комплексов космического назначения — предприятия ПАО «КМЗ».

Список литературы:

1. *Gloesener P. et al.* Manufacturing, testing and alignment of Sentinel-2 MSI telescope mirrors // Journal of Physical Science and Application. – 2013. – Т. 3. – №. 2. – С. 72.
2. *Coyle L. E., Dubin M. B., Burge J. H.* Design and analysis of an alignment procedure using computer-generated holograms //Optical Engineering. – 2013. – Т. 52. – №. 8. – С. 084104-084104.
3. *Заварзин В.И., Лу А.В., Морозов С.А.* Методика сборки и юстировки зеркально-линзовых объективов с эксцентрично расположенным полем изображения. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 7.
URL:<http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/822.html>
4. *Бронштейн Ю.Л.* Крупногабаритные системы (контроль геометрии, юстировка). — М.: ДПК Пресс, 2015. — 600 с., ил.
5. Доклад «Осевые синтезированные голограммы – основа прецизионных лазерно-голографических методов и средств контроля для оптической технологии» на конференции «ГОЛОЭКСПО-2015», г. Казань, А.В. Лукин, В.А. Балоев, Н.П. Ларионов, А.Н. Мельников (ОАО «НПО ГИПО», г. Казань)

ДВОЙНОЙ МОНОХРОМАТОР С ВОГНУТЫМИ ГОЛОГРАММНЫМИ ДИФРАКЦИОННЫМИ РЕШЕТКАМИ

БЕЛОКОПЫТОВ А.А., КУРТ В.И., МУСЛИМОВ Э.Р., СКОЧИЛОВ А.Ф.

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

E-mail: gipo@telebit.ru

Исследованы характеристики малогабаритного двойного монохроматора для ультрафиолетовой (УФ) области спектра в диапазоне длин волн от 200 до 400 нм с использованием голограммных дифракционных решеток на вогнутых сферических подложках. Представлены результаты расчета абберрационных и спектральных характеристик монохроматора, а также зависимости дифракционной эффективности рельефно-фазовых отражательных решеток от длины волны падающего на них излучения, обосновано применение в данном приборе голограммных дифракционных решеток с алюминиевым покрытием.

Ключевые слова: голограммная дифракционная решетка, спектральное приборостроение.

Двойной монохроматор [1] является средством получения оптического излучения с узким спектральным контуром на произвольной длине волны внутри рабочего спектрального диапазона при низком уровне рассеянного света. Применение двойного монохроматора в качестве самостоятельного средства измерения позволяет решать широкий круг актуальных научно-технических задач в следующих областях:

- спектральные измерения в УФ области спектра;
- флуоресцентная, рамановская спектроскопия;
- измерение поглощения и пропускания;
- фильтрация излучения с узкой спектральной полосой пропускания и сильным подавлением рассеянного света [2].

В настоящее время двойные монохроматоры отечественного производства представлены моделями: «МХД-2» фирмы «Люмекс» и спектрофотометром СФ256-УВИ фирмы «ЛОМО ФОТОНИКА». Анализ научно-технической литературы показал, что также для подобных целей применяются двойные монохроматоры советского производства, такие как: ДФС-12, ДФС-24, ДМР-4, СФ-9, либо строятся громоздкие конструкции из двух одинарных монохроматоров типа МДР-2,

МДР-23, УМ-2 или применяются современные двойные монохроматоры зарубежного производства.

В АО «НПО ГИПО» разработан малогабаритный автоматизированный двойной монохроматор со сложением дисперсий для обеспечения измерений оптических характеристик оптико-электронных приборов и аппаратуры в области спектра 200-400 нм с техническими характеристиками, представленными в табл. 1.

Двойной монохроматор – спектральный прибор, состоящий из двух монохроматоров, последовательно состыкованных таким образом, что выходное излучение первого монохроматора является входным излучением второго монохроматора. Последовательное использование двух монохроматоров позволяет достичь очень низкого уровня рассеянного света, а также увеличить дисперсию, получаемую на выходе второго монохроматора, почти в 2 раза. В вакуумной области спектра такие приборы особенно нужны, так как применение фильтров часто является затруднительным. Наличие рассеянного света, в первую очередь при использовании источников сплошного спектра, сильно искажает результаты, что особенно существенно при определении малых коэффициентов поглощения.

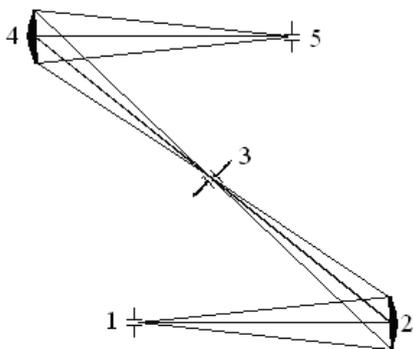


Рисунок 1.

Оптическая схема двойного монохроматора

Двойной монохроматор со сложением дисперсий при большей теоретической разрешающей способности обеспечивает устранение рассеянного света, а при достаточно высоком пропускании может оказаться и более светосильным, чем простой монохроматор. Для реализации этих преимуществ необходимы более жесткие требования к исправлению aberrаций и особенно к механизму сканирования спектра, а также использование минимального количества составляющих монохроматор оптических элементов. Оптическая схема разработанного двойного монохроматора представлена на рис. 1.

Свет от источника фокусируется на входную щель 1 прибора. Прошедший щель пучок падает на первую вогнутую дифракционную решетку 2. Дифрагированный пучок пространственно фильтруется на промежуточной щели 3 и падает на вторую дифракционную решетку 4, полностью идентичную первой решетке. Пучок, дифрагировавший

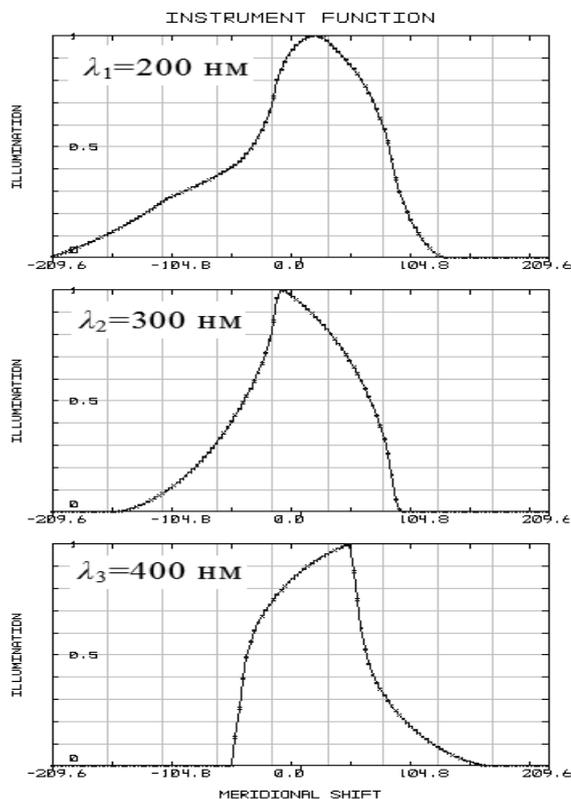


Рисунок 2.

Аппаратные функции двойного монохроматора

на второй решетке, проходит через выходную щель 5 на фотоприемное устройство. Для уменьшения уровня рассеянного света за счет исключения рассеяния на краях дифракционных решеток рабочая поверхность решеток ограничена апертурными диафрагмами.

Аберрационные характеристики двойного монохроматора представлены в табл. 2, где приняты следующие обозначения: m, M – координаты лучей на входном зрачке в меридиональном и сагитальном сечениях; y', z'

Таблица 1.

Технические характеристики двойного монохроматора

Параметр	Значение
Рабочий спектральный диапазон	200-400 нм
Относительное отверстие	1/4.2
Спектральное разрешение	0.16-0.24 нм
Обратная линейная дисперсия	1.6-2.1 нм/мм
Точность установки длины волны	± 0.1 нм
Дифракционная эффективность решеток для $\lambda=300$ нм не менее	40%
Ширина щелей	регулируемая 0-2 мм
Управление	от встроенного контроллера, внешнее управление от персонального компьютера, интерфейс USB2.0
Питание	220 В
Габаритные размеры прибора	не более 450x450x250 мм
Масса	не более 10 кг

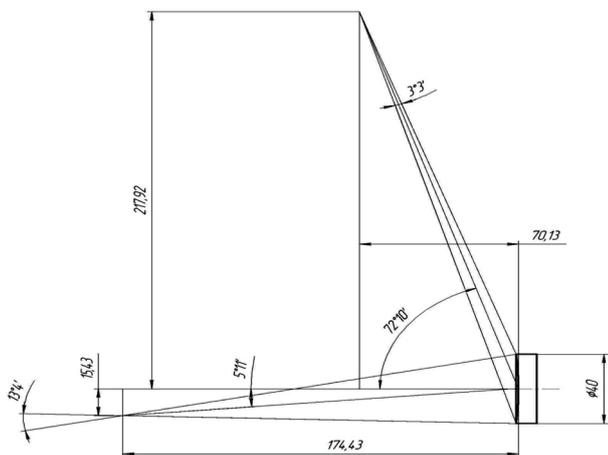


Рисунок 3.

Схема записи решетки двойного монохроматора

- линейные координаты луча на поверхности изображения в меридиональном и сагиттальном сечениях; $\Delta y'$, $\Delta z'$ – разность высот пересечения с плоскостью изображения луча, проходящего через входной зрачок на заданной высоте, и главного луча данной длины волны в меридиональном и сагиттальном сечениях пучка.

Аппаратные функции монохроматора для щели шириной 100 мкм представлены на рис. 2.

Схема записи голограммной дифракционной решетки двойного монохроматора представлена на рис. 3.

Параметры записи: длина волны лазера 441,6 нм, координаты точечных источников (228,9 мм, 1,259 рад) и (175,1 мм, -0,088 рад). Угол отклонения главного луча равен 39° для любой длины волны, что обеспечивает

ся синхронным разворотом решеток 2 и 4. Идентичность дифракционных решеток обеспечивается копированием с одной решетки-матрицы.

Вогнутые дифракционные решетки обладают астигматизмом, снижающим их реальную светосилу. Компенсация астигматизма вогнутых решеток может достигаться созданием системы криволинейных штрихов с переменным периодом. Наиболее пригодны решетки типа II, III и IV по распространенной классификации фирмы Jobin Yvon. Основными методами изготовления дифракционных решеток в настоящее время являются голографический и нарезной. Решетки, полученные каждым из методов, отличаются по своим оптическим характеристикам, и каждый тип обладает преимуществами в конкретных областях применения. Нарезные решетки используются, если требуется высокая дифракционная эффективность. Голограммные решетки используются в тех случаях, когда важную роль играет минимальный уровень рассеянного света и необходимо высокое разрешение.

Нарезные дифракционные решетки изготавливаются путем нарезки алмазным резцом системы штрихов в тонком металлическом слое (алюминий, золото). Нарезка выполняется на прецизионной делительной машине, при строгом соблюдении температурной стабильности и виброизоляции. Заданный угол алмазного резца определяет угол наклона грани штрихов

Таблица 2.

Аберрации для центра входной щели (в мкм)

m	M	$\lambda_1=200$ нм		$\lambda_2=300$ нм		$\lambda_3=400$ нм	
		$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$
-20	0	-5,2	0	-103,6	0	107,7	0
-12	0	25,9	0	-5,1	0	48,5	0
12	0	-96,9	0	23,6	0	-4,9	0
20	0	-191,5	0	27,4	0	13,2	0
0	12	17,6	167,9	6,6	-94,5	3,0	60,4
0	20	48,5	280,7	18,1	-157,9	8,2	99,2

относительно поверхности подложки, который называется углом «блеска».

Голограммные решетки изготавливаются путем регистрации интерференционной картины в фоточувствительном слое. Эти решетки могут иметь плотность штрихов до 6000 мм^{-1} для получения более высокого разрешения. Поскольку голографические решетки получают оптическими методами, они свободны от периодических и случайных ошибок в расположении штрихов и создают намного меньше рассеянного света, чем нарезные решетки.

Нарезные решетки, как правило, имеют несколько более высокую (относительно голограммных) дифракционную эффективность. Однако они создают больше рассеянного света и ложные спектральные линии – «духи», а также имеют место существенные ограничения по размерам рабочей зоны и частоте штрихов.

Очевидно, что оригинальные дифракционные решетки слишком дороги, поэтому обычно используются решетки-копии.

Процесс изготовления решетки-копии начинается с нанесения в вакууме на поверхность решетки-матрицы разделительных слоев. Затем на матрицу наливается слой смолы и сверху помещается подложка копии. После отверждения смолы процесс завершается разделением копии и матрицы.

Технология копирования может использоваться для обоих типов оригинальных дифракционных решеток (матриц). Лучевая прочность решеток-копий, изготовленных как с нарезных, так и с голограммных матриц, составляет около 40 Вт/см^2 для непрерывных лазеров и более 150 мДж/см^2 для импульсных.

Классические голограммные решетки имеют квазисинусоидальный профиль в разрезе. Но существуют методы изготовления решеток с профилем приближенным к пилообразному. Например, использование схем записи во встречных пучках (решетки Шеридона) или путем специальной обработки решеток методами ионного травления. При высоких пространственных частотах характеристики этих

«профилированных» решеток уникальны.

Следует особо упомянуть о решетках с криволинейными штрихами и переменным шагом, изготавливаемых на вогнутых (сферических или асферических) подложках. Эти решетки, получаемые в тщательно рассчитанных и отъюстированных схемах, обладают уникальной способностью исправлять аберрации оптических схем с сохранением высокой эффективности. Современные спектральные приборы, в том числе спектрографы с плоским полем и монохроматоры с простым вращением, создаются с использованием именно таких решеток.

Дифракционная эффективность (ДЭ) решетки, определяемая как отношение потока энергии монохроматического света, дифрагированного в рабочий порядок дифракции m , к потоку энергии падающего на решетку излучения, зависит как от материала отражающего слоя, так и формы профиля штрихов решетки. Зависимость ДЭ решеток двойного монохроматора от длины волны падающего на них неполяризованного оптического излучения была исследована для двух типов профиля штрихов (синусоидальная и треугольная формы профиля) и различных материалов отражающего слоя (золото, серебро и алюминий) на основе строгого решения уравнений Максвелла численными дифференциальными методами [3-5]. Показатели преломления и коэффициенты поглощения металлов, необходимые для расчета ДЭ решеток, были взяты из [6].

Дифракционные решетки, используемые в двойном монохроматоре, работают таким образом, что угол падения θ главного луча зависит от длины волны λ выделяемого монохроматического излучения, причем эта зависимость обеспечивает постоянство угла φ между падающим и дифрагированным в рабочий порядок m лучами ($|\varphi|=39^\circ$). Зависимость $\theta(\lambda)$ находится как решение уравнения

$$\sin(\theta) + m \frac{\lambda}{\Lambda} = \sin(\varphi - \theta)$$

относительно угла θ при заданных значениях m , λ , Λ и φ . Поскольку ДЭ решетки зависит

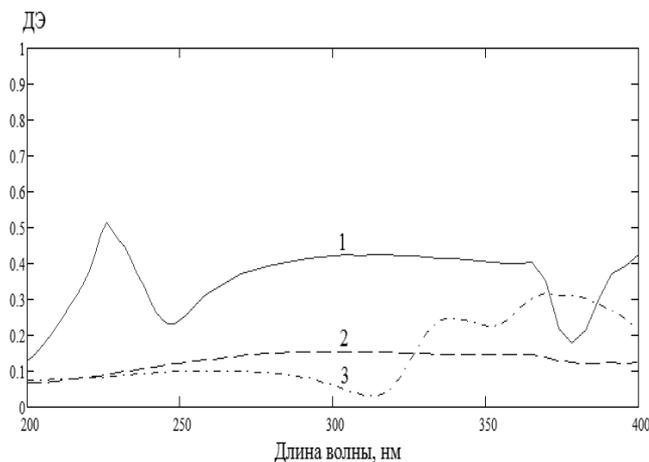


Рисунок 4.

Зависимость ДЭ от λ для синусоидального профиля:
1 – алюминий ($h=100$ нм); 2 – золото ($h=84$ нм),
3 – серебро ($h=84$ нм)

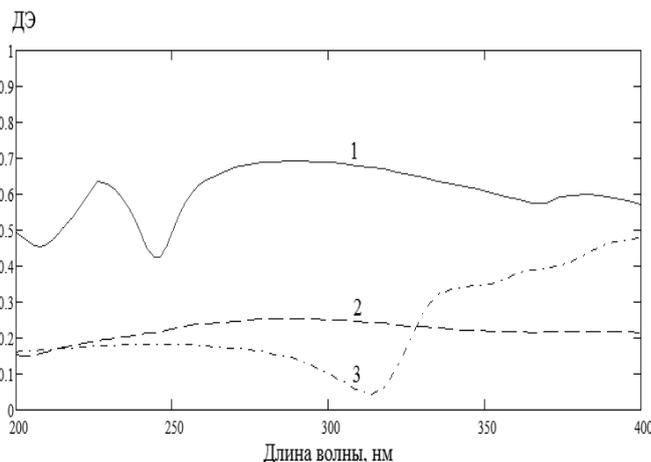


Рисунок 5.

Зависимость ДЭ от λ для треугольного профиля:
1 – алюминий ($\alpha=20^\circ$); 2 – золото ($\alpha=17,5^\circ$),
3 – серебро ($\alpha=17,5^\circ$)

от угла падения на неё оптического излучения, то при расчете ДЭ для заданной длины волны λ необходимо учитывать зависимость $\theta(\lambda)$.

Синусоидальный профиль характеризуется единственным параметром – высотой профиля h . Треугольный профиль штриха характеризуется двумя параметрами – углами при основании α и β , но резцы делительных машин, используемых для нарезания решеток в АО «НПО ГИПО» с таким профилем, имеют обычно форму, при которой угол при вершине треугольного профиля равен 100° , поэтому $\alpha+\beta=80^\circ$, и треугольный профиль также будет характеризоваться только углом «блеска» α . На рис. 4 и рис. 5 представлены результаты расчета ДЭ решеток в диапазоне длин волн от 200 до 400 нм для синусоидального и треугольного профиля штрихов соответственно.

Анализ результатов, представленных на рис. 4-5, показывает, что решетки с отражающим слоем из серебра обладают крайне неравномерной зависимостью ДЭ от длины волны для любой формы профиля штрихов, поэтому использовать серебро в качестве материала решетки в данном диапазоне длин волн нецелесообразно.

Решетки с золотым отражающим покрытием дают максимально равномерную зависи-

мость ДЭ от длины волны для любой формы профиля штрихов, но имеют максимальную ДЭ не более 25%.

Таким образом, наиболее подходящими для использования в двойном монохроматоре являются голограммные решетки с отражающим слоем из алюминия, поскольку обеспечивают наименьший уровень рассеянного света при достаточно высокой дифракционной эффективности.

Список литературы:

1. *Пейсахсон И.В.* Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975, 312 с.
2. Оптический фильтр устройства обнаружения коронного разряда в дневное время суток: пат. 75754 Рос. Федерация. № 2008106420/22; заявл. 19.02.2008; опубл. 20.08.2008. Бюл. № 23.
3. *Lifeng Li*, «Multilayer-coated diffraction gratings: differential method of Chandezon et al. revisited», J. Opt. Soc. Am. 11, p. 2816-2828 (1994).
4. *Lifeng Li, G. Granet, J. P. Plumey, and J. Chandezon*, “Some topics in extending the C method to multilayer gratings of different profiles”, Pure Appl. Opt. 5, p. 141-156 (1996).
5. *Lyndin N., Parriaux O. and Tishchenko A.V.* «Modal analysis and suppression of the FMM instabilities in highly conductive gratings», J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 24, No. 12, p. 3781 (2007).
6. *Marvin J. Weber.* Handbook of Optical Materials, CRC Press, 2003.

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС СЕРИЙНОЙ ПРЕЦИЗИОННОЙ РЕПЛИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ АСФЕРИЧЕСКОЙ И ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ

АХМЕТОВ М.М., БЕЛОЗЁРОВ А.Ф., БАЛОЕВ В.А., БЕЛОКОПЫТОВ А.А., ГАЙНУТДИНОВ И.С.,
ИВАНОВ В.П., ЛУКИН А.В., МЕЛЬНИКОВ А.Н., МОГИЛЮК И.А.

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

E-mail: gipo@telebit.ru

Рассмотрены актуальность, проблемы и общность технологий реплицирования дифракционных решеток и оптических рабочих поверхностей линз и зеркал, преимущественно, асферических. Кратко изложен исторический аспект реплицирования, разрабатывающегося в Государственном институте прикладной оптики (ГИПО) с начала 1960-х гг. Приведены основные звенья технологических цепочек репликации элементов асферической и дифракционной оптики в АО «НПО ГИПО».

Ключевые слова: мастер-матрица, полимеризующийся материал, прецизионное реплицирование, элементы асферической и дифракционной оптики.

В большинстве серийно выпускаемых оптических и оптико-электронных приборов и систем различного назначения, в которых ключевым элементом является дифракционная решетка, она используется в виде решетки-реплики. Этот подход имеет более чем полувековую историю [1, 2].

На основании результатов анализа мирового рынка асферической оптики, выполненного американскими специалистами в 2004 году [3], с учетом их прогноза ежегодного роста объема выпуска этих элементов, следует, что в настоящее время мировой объем выпуска стеклянной асферической оптики превышает один млрд. изделий в год и сохраняет устойчивую тенденцию роста; тем не менее серийное производство асферики является «узким» местом в технологии выпуска многих видов оптических и оптико-электронных приборов. Организация серийного и массового выпуска комбинированных асферических оптических элементов (состоящих из стеклянной основы с тонким полимерным асферическим слоем) позволит в значительной степени снять эти ограничения.

Основными достоинствами технологии репликации являются многократное превосходство по производительности по сравнению с другими известными технологиями формообразования асферических поверхностей и высокая идентичность получаемых оптических элементов-реplik. Комбинированные линзы и зеркала отличаются высокой устойчивостью к внешним воздействиям (в том числе к колебаниям температуры и влажности) и временной стабильностью. Другими словами – обладают основными преимуществами «стеклянной» оптики по сравнению с полимерной, но при этом себестоимость их серийного изготовления существенно ниже. Это обстоятельство, по-видимому, является главным фактором для развертывания в последние годы поисково-исследовательских работ в данном направлении в ряде ведущих стран (США, Европа, Япония, Ю. Корея, Китай) [см., например, 4-7].

Экономические и технологические трудности получения высокоточных и износоустойчивых асферических мастер-матриц являются главным препятствием для

осуществления серийного и массового выпуска комбинированных оптических элементов (линз и зеркал) с асферическими рабочими поверхностями, хотя основные технические решения в этом направлении были найдены и опробованы в те же годы, что и для репликации дифракционных решеток. ДР. Прецизионное формообразование асферических поверхностей на основе использования разрабатываемых в ГИПО с 1960-х годов лазерно-голографических методов и средств технологического и аттестационного контроля формы таких поверхностей позволили преодолеть эти трудности [1].

Процессы репликации рельефно-фазовых структур оптических элементов дифракционной оптики и рабочих поверхностей элементов асферической оптики практически идентичны. Это позволяет основные звенья технологических цепочек (выбор и подготовка полимерных материалов, участки репликации, химической, термо- и фотополимеризации, вакуумных и специальных

покрытий и др.) реализовать как общие для обоих типов изделий. В обоих случаях возможна организация конвейерной формы серийного производства соответствующих реплик. На рис. 1 в качестве иллюстрации представлен принцип получения реплик: выпуклой асферической поверхности линзы (рис. 1а); вогнутой рельефно-фазовой дифракционной решетки (рис. 1б).

В обоих случаях возможно и целесообразно использование подложек с шероховатыми поверхностями. Практика показывает, что при этом существенно улучшается адгезия полимера к рабочей поверхности подложки, а также снижаются производственные затраты.

Первые работы по репликации ДР и асферических поверхностей оптических элементов (линз и зеркал) были выполнены в ГИПО в начале 1960-х годов. В 1968 – 1970 годах были изготовлены и исследованы реплики крупногабаритных вогнутых сферических зеркал-коллиматоров диаметром до 700 мм на облегченных подложках из

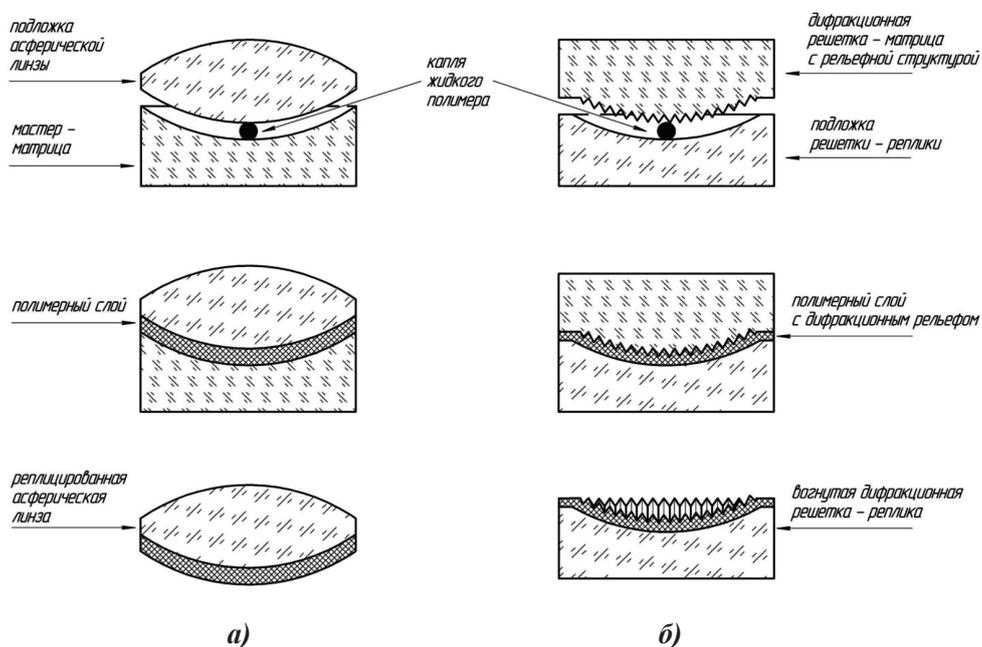


Рисунок 1.

Упрощенная принципиальная схема процессов репликации:

а) выпуклой асферической поверхности линзы,

б) вогнутой рельефно-фазовой дифракционной решетки

сплава алюминия [8]. Следует отметить, что эта технология была реализована также и для контроля светосильных выпуклых асферических поверхностей [9]. Контроль процесса формообразования выпуклой асферики осуществлялся по её вогнутой копии, оперативно получаемой методом фотополимеризации. В контрольную схему с синтезированной голограммой-компенсатором периодически устанавливалась ее вогнутая реплика. Отметим, что синтезировать голограмму для контроля непосредственно такой (светосильной) выпуклой поверхности, как правило, весьма затруднительно или вообще невозможно.

Начиная с 1960-х годов в ГИПО выполнялся ряд НИОКР по разработке базовых технологий изготовления дифракционных решеток-матриц и асферических мастер-матриц и их репликации [10,11]. Успешная разработка лазерно-голографических методов и средств контроля асферических оптических поверхностей на основе использования осевых синтезированных голограмм открыла возможность ускоренного решения проблемы репликации элементов асферической оптики в части изготовления прецизионных асферических мастер-матриц [11 – 13].

В 1976 году в ГИПО был введен в эксплуатацию Отраслевой центр по разработке и серийному выпуску элементов асферической и дифракционной оптики, преимущественно, по замкнутому циклу, располагавшийся в специализированном технологическом 4-этажном здании (рис. 2) с общей площадью 7200 кв.м, в том числе производственной площадью – около 4000 кв. м, включая подземный этаж – заглубленную лабораторию дифракционных решеток (ЗЛДР) с 12-ю вибро- и термостабилизированными кабинами для уникальных делительных машин. Центр был предназначен для обеспечения потребностей в элементах асферической и дифракционной



Рисунок 2.

Специализированное технологическое здание по разработке и серийному выпуску элементов асферической и дифракционной оптики

оптики всех отечественных предприятий оптического приборостроения, а также для поставок на экспорт. В 1980-х годах дополнительно в ЗЛДР были введены в действие технологические установки для получения голограммных дифракционных решеток и круговые делительные машины для изготовления осевых синтезированных голограмм.

В 2003 – 2004 гг. в рамках выполненного с положительными результатами контракта с фирмой «Samsung Electronics» (Ю. Корея) в НПО ГИПО разработан технологический процесс массового выпуска (более 100 тыс. шт. в год) комбинированных линз с одной асферической поверхностью высокого порядка диаметром 68 мм для телевизионного проекционного устройства.

В настоящее время в АО «НПО ГИПО» имеются основные звенья технологических цепочек репликации элементов асферической и дифракционной оптики: участок изготовления подложек, участок изготовления асферических прецизионных мастер-матриц, участок круговых делительных машин, участок изготовления нарезных ДР-матриц, участок изготовления голограммных ДР-матриц, группа оптиче-

ских расчетов, группа лазерно-голографических методов и средств контроля, сектор контроля параметров ДР, механический участок, участок заточки специальных алмазных резцов, химический участок, участки реплицирования элементов асферической и дифракционной оптики, в т.ч. пленочных решеточных поляризаторов, специальных вакуумных покрытий, вакуумного нанесения светочувствительных слоев и ионно-плазменного травления.

В настоящее время АО «НПО ГИПО» приступило к решению задачи серийного выпуска элементов асферической и дифракционной оптики методом прецизионной репликации в объемах, требуемых на рынке производства оптических и оптико-электронных приборов и систем.

Список литературы:

1. Белозёров А.Ф. Оптика России. Очерки истории и развития. Казань: Изд-во «Центр инновационных технологий», 2012 – 2014. Т. 1 – 3.

2. Hutley M.C. Diffraction Gratings. London – New York: Academic Press. 1982. 320 p.

3. Fischer R.E., Hileman D. Age of the Asphere: Bending to Demand // SPIE's OE magazine. April 2004. Pp. 25 – 27.

4. Muranaka M., Takagi M., Maruyama T. Precision Molding of Aspherical Plastic Lens for Cam-Corder and Projection TV // Proc. of SPIE. 1988. Vol. 896. Pp. 123 – 131.

5. Vicker D., LeBlanc R. Midwave Infrared Imager with Plastic Laminated Diffractive/Aspheric Surfaces // Proc. of SPIE. 2001. Vol. 4369. Pp. 642 – 648.

6. Cheng X., Xu D., Hao Q. Numerical Analysis of Compound Aspheric Lens Design and Fabrication // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6034. Pp. 60341S-1 – 60341S-6.

7. Wang Q., Zhao Yu., Zhang L., Yu J. New Exploration of the Optical Aspherical Replication Technique // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7655. Pp. 76551S-1 – 76551S-5.

8. Бейнарович Л.Н., Салимова Э.А., Мартынов В.П. Изготовление крупногабаритных зеркал из полимеров методом копирования // Оптико-механическая промышленность. 1971. № 10. С. 41 – 44.

9. Бейнарович Л.Н., Ларионов Н.П., Лукин А.В. Голографический способ контроля выпуклых асферических поверхностей // А.с. СССР №721672 от 12.09.1977г. Бюл. изобр. № 10, 1980.

10. Стрежнев С.А., Андреева А.И. Вогнутые дифракционные решетки на асферических поверхностях с одной плоскостью симметрии // Оптика и спектроскопия. 1973. Т. 35. Вып. № 5. С. 986 – 988.

11. Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Миронова Т.А., Ньюшкин А.А., Протасевич Д.В., Рафиков Р.А. Синтезированная голограммная оптика // Оптический журнал. 2002. Т.69. № 12. С. 23 – 32.

12. Лукин А.В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. Т.74. № 1. С. 80 – 87.

13. Белозёров А.Ф., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мельников А.Н. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Часть I // Фотоника. 2014. № 4. С. 12 – 32.

НОВЫЙ КЛАСС СПЕКТРОМЕТРОВ-ПОЛИХРОМАТОРОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОПУСКАЮЩИХ ОБЪЕМНО-ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

ТУГАРИНОВ С.Н., БЕЛОКОПЫТОВ А.А.*, ЛУКИН А.В.*, НАУМЕНКО Н.Н.***, САТТАРОВ Ф.А.*, СЕРОВ В.В., ШИГАПОВА Н.М.*, ЯРЦЕВ В.П.

ЧУ ГК «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»

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

**Институт Физики НАН РБ

E-mail: tugar@trinity.ru, gipo@telebit.ru

В статье описан новый класс спектрометров-полихроматоров высокого разрешения на основе пропускающих объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток. Спектрометр-полихроматор высокого разрешения разработан для проведения диагностики плазмы методом активной спектроскопии на установке ИТЭР. Спектрометр создан на основе трех пропускающих голограммных дифракционных решеток и предназначен для работы одновременно в трех спектральных диапазонах: 468 ± 6 нм, 529 ± 6 нм и 656 ± 8 нм с высоким спектральным разрешением. Представлены результаты измерения основных технических параметров спектрометра-полихроматора высокого разрешения.

Ключевые слова: спектрометр, полихроматор, диагностика плазмы, активная спектроскопия, пропускающая голографическая дифракционная решетка.

ВВЕДЕНИЕ

ИТЭР (ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor) – первый в мире экспериментальный термоядерный реактор, строительство которого сейчас ведется во Франции в г. Кадараш. Цель этого международного проекта – продемонстрировать научную и техническую возможность осуществления управляемой термоядерной D-T реакции и получения положительного выхода энергии. Управление работой реактора ИТЭР требует разработки и создания необходимых средств диагностики термоядерной плазмы. Одним из них является так называемый метод активной спектроскопии. Активная спектроскопия (английская аббревиатура CXRS – Charge Exchange Recombination Spectroscopy) с использованием диагностического или нагревного пучка атомов широко используется практически на всех современных токамаках [1,2].

Для реализации активных спектроскопических измерений необходимо одновременно регистрировать следующие спектральные

линии: H I ($n=3-2$) 656,3 нм; He II ($n=4-3$) 468,6 нм; Be IV ($n=6-5$) 465,8 нм; C VI ($n=8-7$) 529,1 нм. При этом необходимо иметь высокое спектральное разрешение на уровне сотых долей нанометра, так как необходимо проводить измерения доплеровского уширения и сдвига спектральных линий.

Как видно из постановки задачи, она является далеко не тривиальной, так как необходимо с высоким спектральным разрешением регистрировать спектральные линии одновременно в синем, зеленом и красном диапазонах видимого излучения. При расстоянии между крайними спектральными линиями порядка 200 нм и необходимой линейной дисперсии порядка 0,4-0,5 нм/мм фокальная плоскость спектрального прибора должна была бы иметь длину порядка 400 мм. Обязательным условием измерений является то, что регистрация обязательно должна осуществляться с помощью ПЗС-датчиков, которые имеют весьма ограниченные линейные размеры, обычно не больше 25-30 мм.

Решение для данной задачи было найдено. Был разработан и создан спектрометр-полихроматор высокого разрешения (СПВР) на основе пропускающих голограммных дифракционных решеток. Принцип работы этого спектрального прибора и его технические характеристики описаны в данной статье.

ОПИСАНИЕ СПЕКТРОМЕТРА-ПОЛИХРОМАТОРА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ (СПВР)

Для реализации активной спектроскопической диагностики на установке ИТЭР необходимо проводить измерения в трех спектральных диапазонах одновременно: 468 ± 6 нм, 529 ± 6 нм и 656 ± 8 нм. При этом надо иметь достаточно высокое спектральное разрешение, чтобы проводить измерение полуширины спектрального профиля и сдвига пика спектральных линий. Так как измерения необходимо проводить в трех спектральных диапазонах далеко разнесенных между собой по спектру, была предложена оптическая схема для трехдиапазонного спектрометра-полихроматора, показанная на рис. 1.

В данной схеме прозрачные дифракционные решетки располагаются последовательно, одна за другой. Углы падения и дифракции для всех трех решеток составляют 60° . Первая решетка имеет высокую дифракционную эффективность для диапазона длин волн 468 ± 6 нм, а остальное излучение проходит сквозь прозрачную решетку. Вторая

решетка имеет высокую дифракционную эффективность для диапазона длин волн 529 ± 6 нм, а остальное излучение также проходит сквозь прозрачную решетку. Третья решетка имеет высокую дифракционную эффективность для диапазона длин волн 656 ± 8 нм, а остальное излучение также проходит сквозь прозрачную решетку. Размеры рабочей зоны решеток составляют 130×260 мм.

При использовании данной схемы появляются следующие требования к дифракционным решеткам: они должны иметь высокую дифракционную эффективность в своем рабочем спектральном диапазоне и высокое пропускание в остальном видимом диапазоне; изображение должно сохраняться как в дифрагированных лучах, так и в лучах, прошедших сквозь решетки. В «НПО ГИПО» (г. Казань) были разработаны и изготовлены объемно-фазовые голографические прозрачные решетки, удовлетворяющие указанным требованиям [3, 4].

В спектрометре использовались разработанные под данную задачу объективы – трехкомпонентные апохроматы. Для изготовления компонент объективов использовались стекла марок ТФ-4, ТК-16 и К-8. Расчет и оптимизация параметров объективов выполнялись с использованием программного обеспечения ZEMAX. Как показали расчеты, кружок рассеяния остаточной аберрации на длине волны 530 нм составляет порядка 10 мкм.

Макет спектрометра, изготовленный по оптической схеме, показанной на рис. 1, представлен на рис. 2. Для большей наглядности на рис. 2 использованы те же обозначения оптических элементов, что и на рис. 1.

Голограммные дифракционные решетки, входящие в состав спектрометра, были протестированы на дифракционную эффективность в рабочих спектральных диапазонах, а также на эффективность прошедшего сквозь решетку излучения (нулевой порядок дифракции) для неполяризованного света. Исследовались следующие решетки: 3700 штр/мм, рабочий диапазон 468 ± 6 нм; 3300 штр/мм, рабочий диапазон 529 ± 6 нм и 2650 штр/мм, рабочий диапазон 656 ± 8 нм.

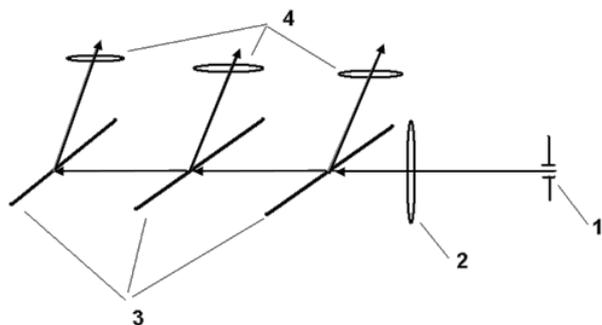


Рисунок 1.

Оптическая схема трехканального спектрометра:

1 – входная щель, 2 – входной объектив,

3 – дифракционные решетки,

4 – выходные объективы

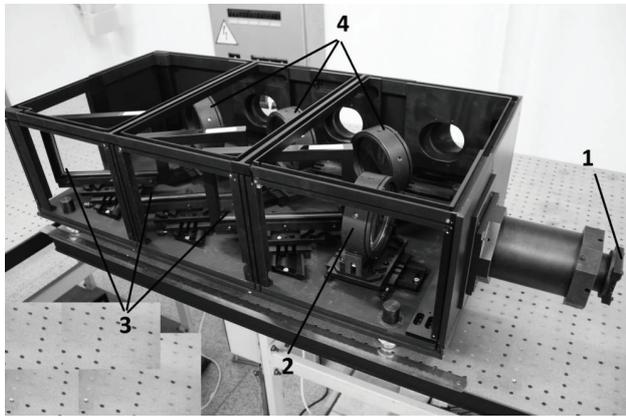


Рисунок 2.
Макет спектрометра

В качестве источников излучения использовались полупроводниковые лазеры с длиной волны: 473, 532 и 656 нм. В результате были получены следующие значения. Для решетки 3700 штр/мм: дифракционная эффективность на длине волны 473 нм – 43%, пропускание на 532 нм – 86%, на 656 нм – 89%. Для решетки 3300 штр/мм: дифракционная эффективность на длине волны 532 нм – 47%, пропускание на 656 нм – 74%. Для решетки 2650 штр/мм: дифракционная эффективность на длине волны 656 нм – 42%, пропускание в данном случае не имеет значения, так как оно важно только для последующих спектральных диапазонов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХДИАПАЗОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

Для измерения величины инструментального профиля спектрометра, а также для проведения калибровки трех спектральных каналов по длинам волн и измерения величин линейной дисперсии в каналах были зарегистрированы спектральные профили излучения дейтериевой и неоновой лабораторных ламп. Для регистрации спектральных профилей использовалась ПЗС-камера, изготовленная в ООО «Проскан специальные инструменты», г. Минск. Камера была изготовлена на базе матрицы HS 101H фирмы Hamamatsu. Данная ПЗС-матрица имеет 1024×58 пикселей размером 24 x 24 мкм и изготовлена по технологии “back thinned”.

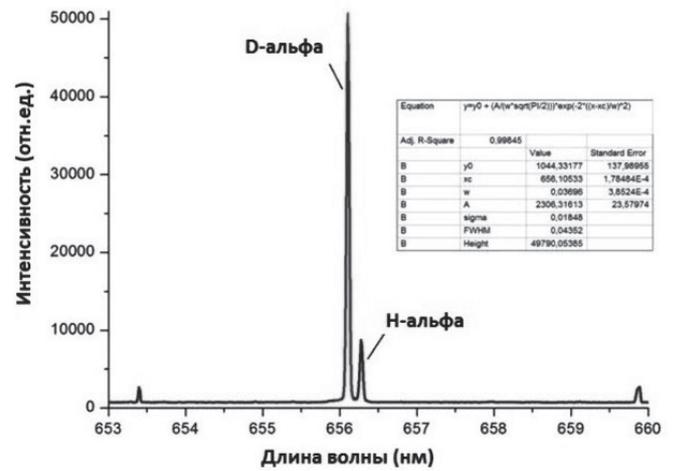


Рисунок 3.
Спектральный профиль излучения дейтериевой лампы (ширина входной щели 75 мкм)

На рис. 3 показан спектральный профиль излучения дейтериевой лампы, зарегистрированный в красном канале спектрометра. В спектре присутствуют линии излучения дейтерия (D-альфа) и более слабая линия водорода (H-альфа), так как водород присутствует в дейтериевой лампе в качестве примеси.

Из рис. 3 видно, что линии дейтерия и водорода очень хорошо разрешаются данным спектрометром, что важно для задач спектроскопии в термоядерной плазме.

Линия дейтерия использовалась для определения ширины инструментального профиля прибора. Для этого профиль линии аппроксимируется с помощью кривой Гаусса, и полуширина этой кривой дает значение величины (полуширины) инструментального профиля спектрометра (при данной ширине входной щели). Параметры гауссиана приведены в таблице на рис. 3. Видно, что инструментальный профиль прибора идеально аппроксимируется кривой Гаусса (кривая Гаусса неотличима от профиля линии), а полуширина инструментального профиля (FWHM) и, соответственно, спектральное разрешение составляет 0,0435 нм при использованной ширине входной щели, равной 75 мкм.

Величина линейной дисперсии спектрометра измерялась с использованием хорошо известных спектральных линий неона, длины волн которых приведены в [5]. Приведем описание процедуры данных измерений на примере зеленого канала спектрометра.

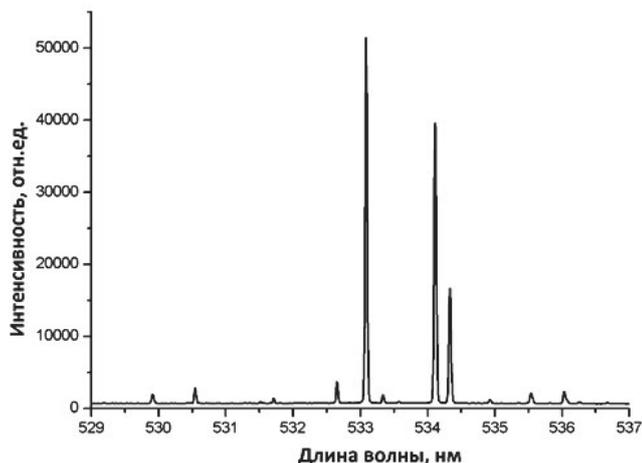


Рисунок 4.

Спектральный профиль излучения неоновой лампы в зеленом диапазоне (ширина входной щели 75 мкм)

На рис. 4 представлен спектральный профиль излучения неоновой лампы, зарегистрированный в зеленом канале. В спектре присутствует большое количество линий, из которых три линии являются наиболее яркими. Линейное расстояние между пиками спектральных линий измерялось по расстоянию между ними в пикселах и известному размеру пиксела, равному 24 мкм. Величина обратной линейной дисперсии вычислялась как $D^* = \delta\lambda / \delta L$, где D^* - обратная линейная дисперсия в нм/мм, $\delta\lambda$ - разница длин волн двух спектральных линий в нм, δL - расстояние между двумя спектральными линиями в мм. Эти данные, полученные экспериментальным путем, необходимо сравнить с теоретическими расчетами.

Искомую формулу, связывающую обратную линейную дисперсию с длиной волны, можно получить из соотношения для интерференционных максимумов дифракционной решетки и выражения для линейной дисперсии [6]:

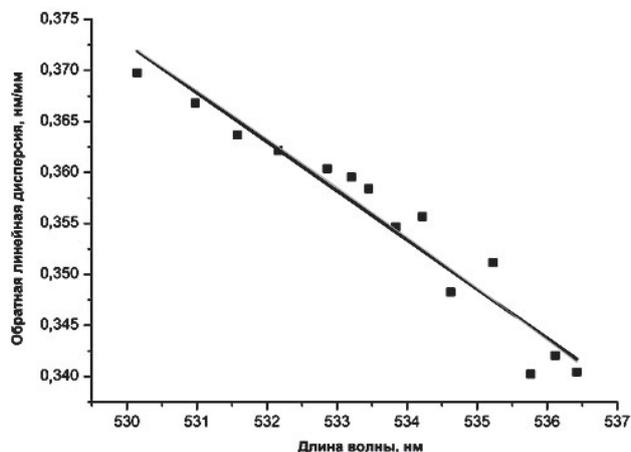


Рисунок 5.

Зависимость значения обратной линейной дисперсии от длины волны

$$d \cdot (\sin\psi + \sin\varphi) = m \cdot \lambda \quad (1)$$

Здесь ψ – угол падения, φ – угол дифракции, d – период решетки, λ – длина волны падающего света, m – порядок дифракции (в нашем случае $m = 1$).

$$D_x = \frac{f}{d \cdot \cos\varphi} \quad (2)$$

Здесь f – фокусное расстояние объектива. Подставив (1) в (2) можно получить выражение для обратной линейной дисперсии как функции от угла падения.

$$\frac{1}{D_x} = \frac{d}{f} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{d} - \sin\psi\right)^2} \quad (3)$$

На рис. 5 представлена зависимость значения обратной линейной дисперсии от длины волны. Экспериментальные значения линейной дисперсии, полученные по линиям неона, показаны черными квадратами. Сглаженная кривая, построенная по экспериментальным точкам, показана серым цветом. Теоретическая кривая, построенная по формуле (3), показана черным цветом. Теоретическая кривая согласуется с эксперименталь-

Таблица 1.

Величина обратной линейной дисперсии спектрометра в трех каналах

Центральная длина волны (нм)	471	532	656
Величина обратной линейной дисперсии (нм/мм)	0,34	0,36	0,50

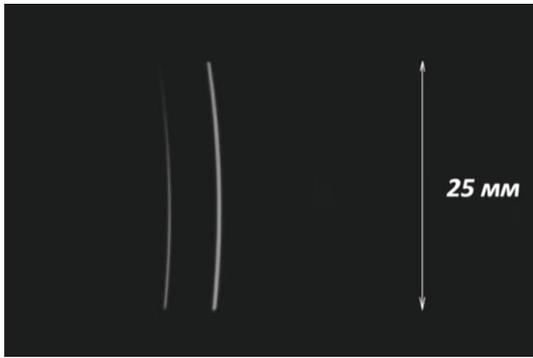


Рисунок 6.

Спектральные линии неона в случае использования прямой входной щели

ной сглаженной кривой с точностью не хуже 0,4%. Результаты лабораторных измерений величины обратной линейной дисперсии в трех спектральных каналах приведены в Таблице 1.

УСТРАНЕНИЕ КРИВИЗНЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Если в тестируемом спектрометре использовать прямую входную щель, то спектральные линии будут иметь заметную кривизну, вносимую дифракционной решеткой.

На рис. 6 показана фотография спектральных линий неона в случае использования прямой входной щели. При этом высота щели составляла 25мм. Для того чтобы устранить нежелательную кривизну спектральных линий, в спектрометре используется изогнутая входная щель с радиусом кривизны ~ 120 мм. Как было сказано выше, все три дифракционные решетки работают при одинаковых углах падения и дифракции, равных 60° . Поскольку кривизна спектральных линий зависит от фокусного расстояния объектива и от углов падения и дифракции [6], то в данном спектрометре кривизна спектральных линий может быть устранена одновременно во всех трех каналах. Это было подтверждено экспериментально в лабораторных исследованиях. С помощью изогнутой щели удалось полностью компенсировать кривизну спектральных линий.

На рис. 7 показаны те же самые спектральные линии неона в красном спектральном канале, что и на рис. 6, но с использованием

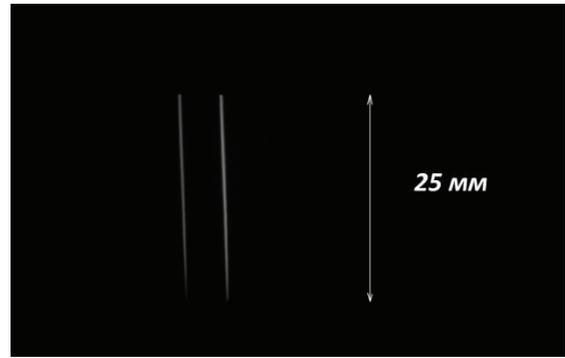


Рисунок 7.

Спектральные линии неона в случае использования изогнутой входной щели

изогнутой щели. При этом высота щели также составляла 25 мм.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНОГО ПРОПУСКАНИЯ СПЕКТРОМЕТРА

Полное пропускание спектрометра было измерено независимо во всех трех спектральных каналах на следующих длинах волн: в синем канале – 473 нм, в зеленом канале – 530 нм, в красном канале – 656 нм. Для измерений использовались полупроводниковые лазеры. Пропускание спектрометра T в каждом канале определялось как отношение мощности излучения на выходе спектрометра P_2 к мощности излучения на входе спектрометра P_1 на данной длине волны: $T = P_2 / P_1$.

В результате измерений были получены следующие величины полного пропускания спектрометра в каналах: синий канал $T = 0,36$; зеленый канал $T = 0,34$; красный канал $T = 0,25$.

В результате проведенного тестирования было отмечено, что полное пропускание спектрометра-полихроматора, главным образом, зависит от эффективности дифракции и пропускания пропускающих дифракционных решеток.

ОЦЕНКА КОНТРАСТА СПЕКТРОМЕТРА-ПОЛИХРОМАТОРА

Хорошо известно, что в спектре неоновой лампы имеется большое количество очень ярких спектральных линий в красном диапазоне видимого спектра и слабых линий в сине-зеленом диапазоне. Поэтому для изме-

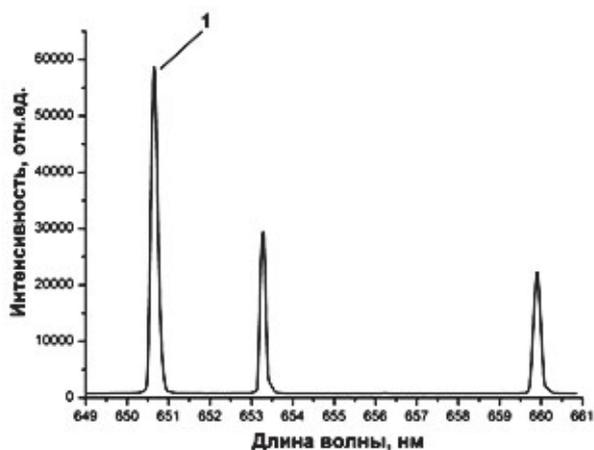


Рисунок 8.

Спектральный профиль излучения неоновой лампы в красном диапазоне (ширина входной щели ~200 мкм)

рения контраста спектрометра проводилась регистрация спектрального профиля излучения трубки Гейслера с неоновым наполнением в красном и зеленом спектральных каналах. При этом для измерения интенсивности спектральных линий в обоих каналах использовалась одна и та же ПЗС-камера, а трубка Гейслера имела стабилизированный источник питания постоянного тока, и стабильность ее излучения во время эксперимента контролировалась с помощью фотодиода. Используемая для измерений ПЗС-матрица имеет квантовую эффективность ~

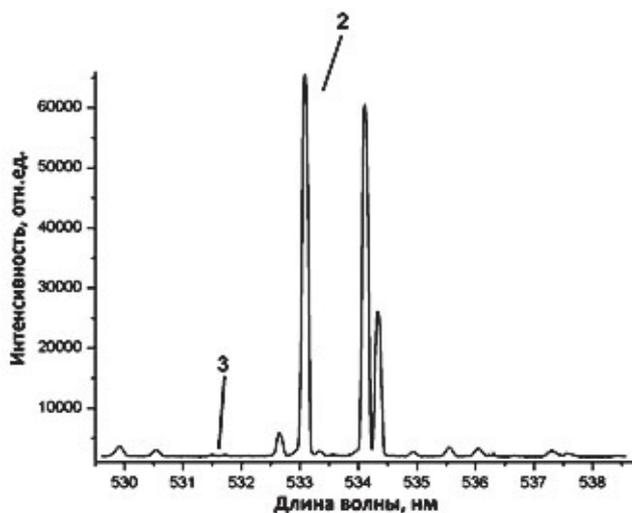


Рисунок 9.

Спектральный профиль излучения неоновой лампы в зеленом диапазоне (ширина входной щели ~200 мкм)

90% как в красном, так и зеленом каналах, поэтому чувствительность ПЗС-камеры была одинаковой в обоих каналах.

На рис. 8 показан спектральный профиль излучения неоновой лампы в красном диапазоне. При этом время экспозиции камеры составляло минимально возможные 10 мс, и для предотвращения насыщения сигнала использовался нейтральный светофильтр с ослаблением в 8 раз. Цифрой 1 обозначена спектральная линия, интенсивность которой сравнивалась с интенсивностью линии в зеленом диапазоне.

На рис. 9 показан спектральный профиль излучения неоновой лампы в зеленом диапазоне. При этом время экспозиции камеры составляло 250 мс, без светофильтра. Цифрой 2 обозначены яркие спектральные линии, а цифрой 3 обозначена слабая линия, интенсивность которой сравнивалась с интенсивностью линии в красном диапазоне.

На рис. 10 показан тот же самый спектральный профиль излучения неоновой лампы в зеленом диапазоне, только в более крупном масштабе по оси Y. На рис. 10 хорошо видна спектральная линия, обозначенная цифрой 3, что позволяет измерить ее интенсивность.

По отношению интенсивности линий 1 и 3 в двух спектральных диапазонах можно оценить контраст спектрометра:

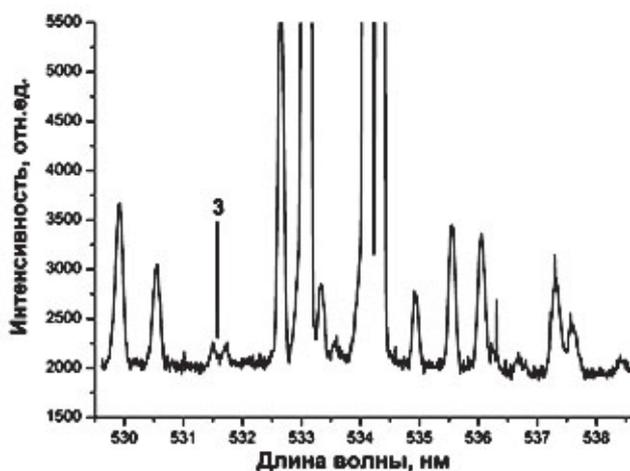


Рисунок 10.

Спектральный профиль излучения неоновой лампы в зеленом диапазоне (ширина входной щели ~200 мкм)

$$K_{\text{(контр.)}} = I_1 / I_3 = 60\,000 \times 25 \times 8 / 200 = 60\,000$$

Очевидно, что такая величина контраста не является предельным значением для самого спектрометра, так как были использованы линии, имеющиеся в спектре неоновой лампы и попадающие в регистрируемые диапазоны. Поэтому можно утверждать, что значение контраста для самого спектрометра можно оценить как: $K_{\text{(контр. спектрометра)}} \gg 60\,000$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате лабораторного тестирования трехдиапазонного спектрометра-полихроматора высокого разрешения были измерены его основные технические параметры, значения которых приведены ниже:

- рабочие спектральные диапазоны: 468 ± 6 нм, 529 ± 6 нм и 656 ± 8 нм;
- полное пропускание спектрометра: 0,25 – 0,35;
- относительное отверстие = 1/3;
- обратная линейная дисперсия: 0,34 – 0,50 нм/мм;
- увеличение в обеих плоскостях = 1;
- высота щели: до 25 мм;
- плоскость изображения: до 25×25 мм;
- максимальное спектральное разрешение $\sim 0,02$ нм;
- контраст спектрометра: $K_{\text{(контр. спектрометра)}} \gg 60\,000$.

Описанный трехдиапазонный спектрометр-полихроматор был создан для определенной прикладной задачи. Однако, используя описанный принцип и схему работы спектрометра-полихроматора, можно создавать спектральные приборы для различных при-

кладных задач. Поэтому, по мнению авторов данной статьи, можно утверждать о появлении нового класса спектрометров-полихроматоров высокого разрешения на основе пропускающих голограммных дифракционных решеток.

Результаты получены при проведении НИ-ОКР «Разработка и изготовление макетов оптических элементов для диагностической системы «Активная спектроскопия» в 2015-2016 годах» по договору № 845/281 от 15.10.2015 г. с Частным учреждением Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР».

Список литературы:

1. Сборник статей под ред. М.И. Пергамента, «Диагностика плазмы», вып.7, с.56-111, Москва, Энергоатомиздат, 1990
2. M.G. von Hellermann, et.al., Rev. Sci. Instrum. Vol. 61, No. 11, 1990, p. 3479-3486
3. А.В. Лукин, «Голограммные оптические элементы», Оптический журнал, 2007, т.74, №1, с.80-87
4. А.В. Лукин, Н.М. Шигапова, «Голограммы Ю.Н. Денисюка на «толстых» слоях БХЖ как оптические элементы: селективные зеркала, Notch-фильтры, дифракционные решетки». В сб. трудов Всероссийского семинара «Ю.Н. Денисюк-основоположник отечественной голографии», С-Петербург, 2007г., с. 144-147
5. А.Р. Стриганов, Г.А. Одинцова, «Таблицы спектральных линий атомов и ионов», Москва, Энергоиздат, 1982
6. В.И. Малышев, «Введение в экспериментальную спектроскопию», Москва, «Наука», 1979

АДАПТИВНАЯ СТЕРЕОФУНДУС-КАМЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ 3D ИЗОБРАЖЕНИЯ СЕТЧАТКИ ГЛАЗА ПАЦИЕНТА С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

ХОРОХОРОВ А.М., ЧУРЛЯЕВ Ф.А., ШИРАНКОВ А.Ф.

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

E-mail: a.horohorov@yandex.ru, fedrdr@mail.ru, ashirankov@mail.ru

Рассмотрена фундус-камера для получения объемного изображения глазного дна пациента. Для получения снимков высокой четкости применяется адаптивная компенсация аберраций глаза пациента. Для фоторегистрации стереопары используется только один комплект адаптивной оптики, что существенно снижает себестоимость прибора.

Ключевые слова: фундус-камера, офтальмоскопия, глазное дно, сетчатка глаза, адаптивная оптика, 3D изображение сетчатки.

Большое значение при лечении глазных заболеваний имеет уровень диагностики. Выявление заболеваний на ранних стадиях во многих случаях позволяет осуществить эффективное лечение без хирургического вмешательства. Одним из методов диагностики заболеваний глаз является наблюдение и фоторегистрация глазного дна пациента с помощью фундус-камеры [1,2].

Глаз человека является динамической оптической системой, аберрации которой флуктуируют с течением времени вследствие аккомодации, дрожания цилиарных мышц, движения слезной пленки и других факторов [3-8]. Как следствие, не удается получить изображение сетчатки глаза с высокой четкостью. Измеряя аберрации оптической системы глаза пациента в режиме реального времени и осуществляя динамическую коррекцию [9-15], можно получить качество изображения, соответствующее характерному размеру сетчатой структуры глазного дна. Кроме того, для диагностики ряда заболеваний необходимо обеспечить стереоскопическое, т.е. трехмерное, наблюдение глазного дна пациента.

Все эти задачи в полной мере позволяет решить разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана адаптивная стереофундус-камера, схема которой представлена на рис. 1.

Принцип работы прибора следующий. Коллимированное излучение полупроводникового лазера фокусируется оптической системой глаза пациента на сетчатку, образуя опорный источник. Излучение опорного источника, пройдя через оптическую систему глаза в обратном направлении, искажается аберрациями глаза пациента. Искаженный волновой фронт направляется на адаптивное зеркало, расположенное в плоскости оптически сопряженной со зрачком глаза пациента.

После отражения от адаптивного зеркала, излучение посредством светоделителя направляется на датчик Шака-Гартмана, также расположенный в плоскости оптически сопряженной с плоскостью зрачка глаза пациента. Датчик Шака-Гартмана измеряет форму волнового фронта и данная информация поступает в Блок управления адаптивной системой, который формирует управляющее воздействие на адаптивное зеркало, изменяя его форму таким образом, чтобы скомпенсировать аберрации оптической системы глаза пациента.

Измерение и компенсация аберраций происходит динамически в режиме реального времени.

Для получения изображения глазного дна сетчатка глаза пациента подсвечивается с помощью осветительного канала прибора (рис. 2).

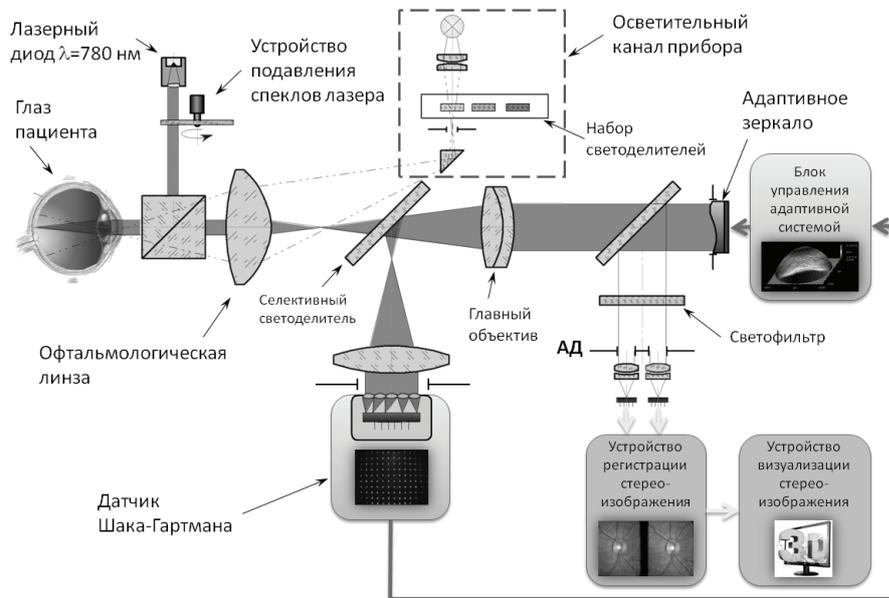


Рисунок 1.

Схема работы канала измерения и компенсации aberrаций глаза пациента

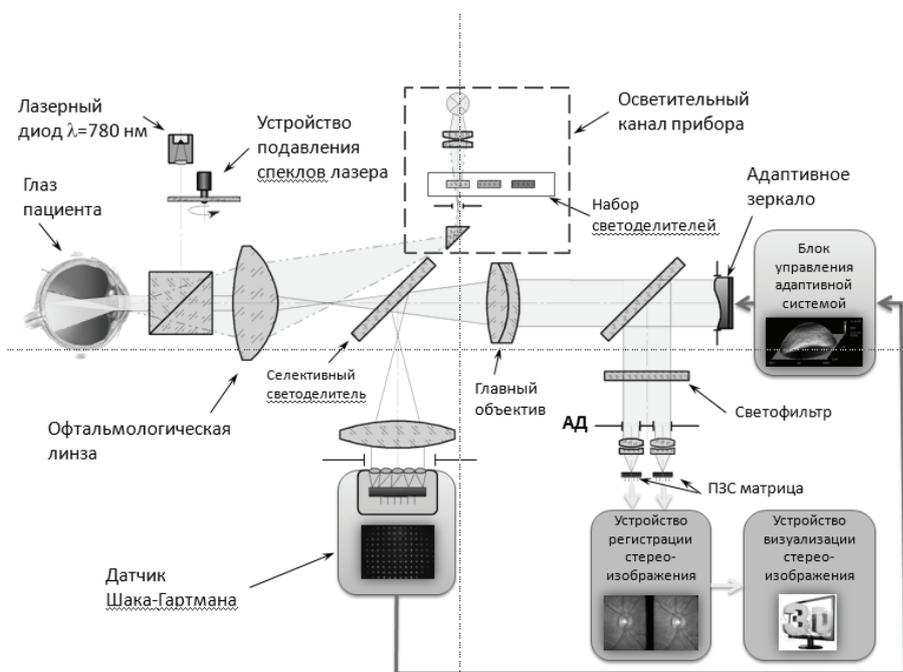


Рисунок 2.

Схема фоторегистрации изображения глазного дна пациента

Таблица 1.

Расчетные характеристики прибора

Характеристика	Значение
Угловое поле зрения	16 x 12°
Спектральный диапазон	0,38...0,76 мкм
Диаметр зрачка глаза пациента	> 6 мм
Оптическое разрешение в пространстве предметов (на сетчатке глаза)	~ 3,5 мкм
Разрешение изображения	~ 12 Мрпх
Точность измерения aberrаций	~ $\lambda/30$
Точность компенсации aberrаций	~ $\lambda/5$

Свет, отразившись от сетчатки глаза, проходит через офтальмологическую линзу, главный объектив и отражается от адаптивного зеркала, испытывая при этом коррекцию волнового фронта. Далее излучение направляется в канал фоторегистрации, где изображение глазного дна пациента записывается с помощью двух ПЗС матриц. Полученная стереопара направляется на устройство визуализации объемного изображения.

Отличительной особенностью данной оптической системы является применение только одного комплекта адаптивной оптики для стереосъемки, что существенно удешевляет себестоимость прибора.

Прибор имеет следующие особенности:

- высокая разрешающая способность;
- объемное изображение сетчатки глаза пациента;
- возможность построения карты глубины по стереопаре;
- измерение аберраций глаза пациента, что позволяет назначать рецепт на очки, контактные линзы или лазерную коррекцию зрения;
- используется только один комплект адаптивной коррекции для стереосъемки.

Расчетные характеристики прибора представлены в табл. 1.

Оценочная стоимость прибора (~1 млн. руб), что соизмеримо со стоимостью высококачественных зарубежных фундус-камер (от 0,7 до 1 млн руб) и существенно меньше стоимости оптических когерентных томографов (от 3,5 млн руб до 7,5 млн руб).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стереоскопичность изображения при высокой разрешающей способности прибора является обязательным условием при диагностике ряда заболеваний (особенно для оценки повреждения зрительного диска при глаукоме), позволяет получить качественно новый уровень диагностики глазных заболеваний, обеспечивая диагностику заболеваний на ранних стадиях. Проектируемый прибор не имеет прямых аналогов в мире.

Значительно меньшая стоимость прибора по сравнению с оптическим когерентным томографом, а также модульность оптической системы прибора позволяет без существенных изменений выпускать как полнофункциональную модель прибора, так и две базовые модели, с более низкой стоимостью.

Список литературы:

1. Волков В.В., Горбань А.И. и Джалилишвили О.А. Клиническое исследование глаза с помощью приборов, Л., 1971;
2. Балашевич Л.И. Рефракционная хирургия. – Санкт-Петербург, 2002. – С.285.
3. Mrochen M., Kaemmerer M., Mierdel P., Krinke H.E., Seiler T. Principles of Tscherning Aberrometry.// J. Refract. Surg. – 2000.– Vol. 16. – No 5. – P. 570–571.
4. Molebny V.V., Panagopoulou S.I., Molebny S.V., Wakil Y.S., Pallikaris I.G. Principles of Ray Tracing Aberrometry.// J. Refract. Surg. – 2000.– Vol. 16. – No 5. – P. 572–575.
5. Thibos L.N. Principles of Hartmann–Shack Aberrometry.// J. Refract. Surg. – 2000.– Vol. 16. – No 5. – P. 563–565.
6. Корнюшина Т.А., Розенблюм Ю.З. Аберрации оптической системы глаза человека и их клиническое значение.// Вестник оптометрии. – 2002. – №3. – С.13–20
7. Семчишен В., Мрохен М., Сайлер Т. Оптические аберрации человеческого глаза и их коррекция.// Рефракционная хирургия и офтальмология. – 2003. – Т.3.– №1. – С. 5–13
8. Артадь П. «Суперзрение»: факты и вымыслы.// Вестник оптометрии. – 2002. – №4. – С.34–41.
9. А.В.Ларичев, П.В.Иванов, Н.Г.Ирошников, В.И.Шмальгаузен. Определение аберраций глаза в присутствии спекл-поля – «Квантовая электроника», 31, № 12(2001);
10. Vassilios Albanis, Erez N. Ribak and Yuval Carmon. Speckle reduction in ocular wave-front sensing – Department of Physics, Technion-Israel Institute of Technology, Technion City, Haifa 32000 Israel;
11. Prieto, P.; Fernández, E.; Manzanera, S.; Artal, P. Adaptive optics with a programmable phase modulator: Applications in the human eye. Opt. Exp. 2004, 12, 4059–4071
12. Fernández, E.; Prieto, P.; Artal, P. Adaptive optics binocular visual simulator to study stereopsis in the presence of aberrations. JOSA A 2010, 27, A48–A55.
13. Kong, N.; Li, C.; Xia, M.; Li, D.; Qi, Y.; Xuan, L. Optimization of the open-loop liquid crystal adaptive optics retinal imaging system. J. Biomed. Opt. 2012, doi:10.1117/1.JBO.17.2.026001.
14. Hampson, K. Topical review: Adaptive optics and vision. J. Mod. Opt. 2008, 55, 3425–3467.
15. Liang, J.; Miller, D.T.; Williams, D.R. Supernormal and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. JOSA A 1997, 14, 2884–2892.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СВЕТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ RGB-КЛАСТЕРОВ

ПАВЛОВ В.Ю., ПЯСЕЦКИЙ В.Б., ХОРОХОРОВ А.М., ШИРАНКОВ А.Ф.

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

E-mail: p.v.u@mail.ru, piassetsky@bmsu.ru, a.horohorov@yandex.ru, ashirankov@mail.ru

Требования к источникам белого цвета. Светоизлучающие диоды. Световая эффективность. Анализ световой эффективности «белых» светодиодных осветительных систем. Связь между световыми и энергетическими характеристиками. Расчет световой эффективности осветительных систем.

Ключевые слова: световая эффективность, характеристики оптического излучения, кривые сложения цветов, расчет световой эффективности 3-х и 2-х цветных СИД.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения многих практических задач, связанных с применением искусственных осветительных систем, требуются источники белого света. К таким источникам предъявляется ряд требований: экономичность, безопасность, приемлемые массогабаритные параметры для рациональных конструкторских решений осветительных систем, а также длительный срок службы. Светоизлучающие диоды (СИД) имеют ряд преимуществ перед такими экономичными источниками белого света, как люминесцентные и галогенные лампы: более высокую световую эффективность при малых габаритах, отсутствие высокотоксичных веществ и материалов, относительно низкие рабочие температуры, устойчивость к механическим нагрузкам, большой срок службы, а также возможность электронного диммирования – управления световым потоком посредством широтно-импульсной модуляции силы питающего тока [1, 2].

Одним из наиболее важных является вопрос о световой эффективности светодиодных осветительных систем (см., например, [3-7]). Поскольку СИД по сути являются источниками квазимонохроматического излучения, то в осветительных системах используются не собственно СИД, а светодиодные устройства, представляющие собой источники белого (или близкого к белому) излучения [8-10]:

- фотолюминесцентные СИД коротковолнового излучения с люминофорным покрытием: голубого излучения (В) с двухкомпонентным красно-зеленым (RG) люминофором, эквивалентные им голубого (В) излучения с желтым (Y) люминофором, а также ультрафиолетового излучения с трехкомпонентным (и более) красно-зелено-синим (RGB) люминофором;

- группы цветных красно-зелено-синих СИД (RGB-кластеры).

Целью настоящей статьи является анализ световой эффективности «белых» светодиодных осветительных систем, состоящих из 3-х, 2-х или произвольного числа n квазимонохроматических цветных источников, на основе стандартной методики расчёта световой эффективности.

СВЯЗЬ МЕЖДУ ЦЕТОВЫМИ, СВЕТОВЫМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В колориметрической системе CIE RGB 1931 любой цвет, в том числе белый, может быть выражен тремя линейно независимыми цветами, называемыми основными [11]. В качестве основных цветов приняты монохроматические излучения: красное R ($\lambda_R = 700$ нм), зелёное G ($\lambda_G = 546,1$ нм), синее B ($\lambda_B = 435,8$ нм). Для получения белого света соотношение световых потоков [лм] или яркостей излучения [кд/м²] основных цветов должно быть следующим:

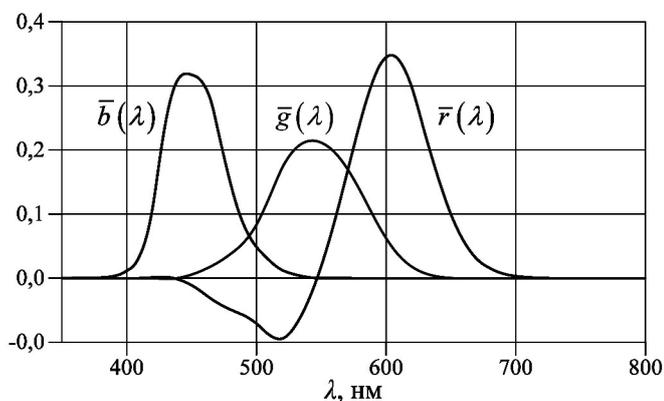


Рисунок 1.

Кривые сложения цветов RGB CIE 1931

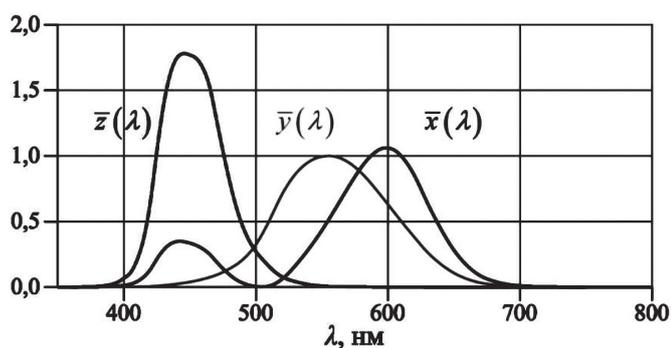


Рисунок 2.

Кривые сложения цветов XYZ CIE 1931

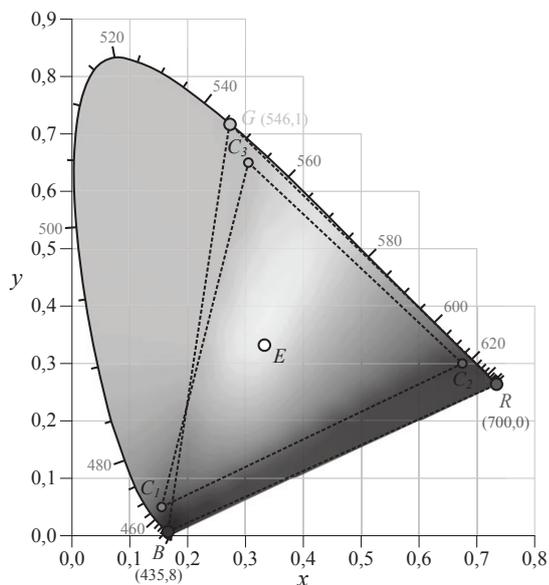


Рисунок 3.

Диаграмма цветности xy CIE 1931

$$F_R : F_G : F_B = 680 : 3121 : 41 \approx 1 : 4,5907 : 0,0601$$

Это же соотношение может быть выражено в энергетических величинах [Вт]:

$$F_{Re} : F_{Ge} : F_{Be} = 243,9 : 4,66 : 3,38$$

Основные цвета R , G и B , взятые при указанных соотношениях потоков монохроматических излучений, называются единичными основными цветами, а любой цвет может быть выражен соотношением:

$$C = r'R + g'G + b'B \quad (1)$$

где r', g', b' – коэффициенты цвета – величины, определяющие количество единичных основных цветов для получения цвета C

Величину

$$m = r' + g' + b' \quad (2)$$

называют цветовым модулем, а нормированные на модуль коэффициенты цвета называются коэффициентами (координатами) цветности:

$$r = \frac{r'}{m}, g = \frac{g'}{m}, b = \frac{b'}{m} \quad (3)$$

В частности, для белого цвета E $r' = g' = b' = 1$ и $r = g = b = 1/3$

Стандарт CIE RGB 1931 определяет функции сложения цветов $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$, и представляющие собой координаты цветности, необходимые для получения монохроматического излучения единичной мощности с длиной волны λ (рис. 1).

Более универсальная колориметрическая система CIE XYZ 1931 представляет соответствующие функции сложения цветов $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ (рис. 2).

Функция $\bar{y}(\lambda) \equiv V(\lambda)$, где $V(\lambda)$ – относительная функция спектральной световой эффективности излучения, или относительная спектральная чувствительность зрительной системы человека, соответствующего понятию «стандартный фотометрический наблюдатель» CIE 1924 и «стандартный колориметрический наблюдатель» CIE 1931. Все возможные цветности формируют палитру человеческого зрения, ограниченную кривой, называемой спектральным локусом и определяющей координаты цветности всех видимых монохроматических излучений (рис. 3).

Следует отметить, что функция $V(\lambda)$ СЕ 1931 года определена для условий наблюдения цветных предметов с угловым размером 2° . В 1964 году МКО приняла дополнительную модель стандартного колориметрического наблюдателя для условий наблюдения цветных предметов с угловым размером 10° .

РАСЧЁТ СВЕТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ 3-Х ЦВЕТНЫХ СИД

Светодиодный кластер белого излучения на основе трех СИД с излучениями линейно независимых цветов является реализацией теоретического представления трехмерности любого, в том числе белого, цвета. При расчёте осветительных систем на базе трёх квазимонохроматических СИД основное внимание должно быть обращено на то, чтобы при смешении выбранных цветов C_1, C_2 и C_3 можно было получить белый цвет E с заданными координатами цветности. Это означает, что точка $E(x_E, y_E)$ должна находиться внутри треугольника, образованного точками $C_1(x_1, y_1), C_2(x_2, y_2)$ и $C_3(x_3, y_3)$ (рис. 3).

Если нормированные спектральные плотности излучения СИД равны $L_1(\lambda), L_2(\lambda), L_3(\lambda)$, то, по определению, соответствующие яркости единичных цветов будут равны:

$$F_R = f_1 L_{1r} + f_2 L_{2r} + f_3 L_{3r},$$

$$F_G = f_1 L_{1g} + f_2 L_{2g} + f_3 L_{3g},$$

$$F_B = f_1 L_{1b} + f_2 L_{2b} + f_3 L_{3b},$$

или в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} F_R \\ F_G \\ F_B \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1r} & L_{2r} & L_{3r} \\ L_{1g} & L_{2g} & L_{3g} \\ L_{1b} & L_{2b} & L_{3b} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где f_1, f_2, f_3 – коэффициенты, пропорциональные световым потокам цветов C_1, C_2, C_3 ; L_{ir}, L_{ig}, L_{ib} – величины, характеризующие взаимное положение спектров источников и функций сложения цветов:

$$\begin{aligned} L_{ir} &= \int L_i(\lambda) \bar{r}'(\lambda) d\lambda, & L_{ig} &= \int L_i(\lambda) \bar{g}'(\lambda) d\lambda, \\ \int L_{ib} &= \int L_i(\lambda) \bar{b}'(\lambda) d\lambda, & & \\ i &= 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (5)$$

В формулах (5) функции $\bar{r}'(\lambda), \bar{g}'(\lambda), \bar{b}'(\lambda)$ представляют собой функции сложения цветов, умноженные на коэффициенты перевода энергетических величин к цветностям, а именно:

$$\begin{aligned} \bar{r}'(\lambda) &= 243,9 \bar{r}(\lambda), & \bar{g}'(\lambda) &= 4,66 \bar{g}(\lambda), \\ b'(\lambda) &= 3,38 \bar{b}(\lambda), \end{aligned} \quad (6)$$

Если в системе уравнений (4) принять установленные соотношения для единичных цветов, т.е. $F_R = 1, F_G = 4,5907, F_B = 0,0601$, то коэффициенты f_1, f_2, f_3 легко находятся методом (правилом) Крамера:

$$f_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}, \quad (7)$$

где $\Delta = \begin{vmatrix} L_{1r} & L_{2r} & L_{3r} \\ L_{1g} & L_{2g} & L_{3g} \\ L_{1b} & L_{2b} & L_{3b} \end{vmatrix}$

– главный определитель системы; Δ_i – определитель вида Δ , в котором i -ый столбец заменён соответственно на столбец величин F_R, F_G, F_B .

Найденные значения f_1, f_2, f_3 представляют собой, по существу, искомые единичные световые потоки для триады цветов C_1, C_2, C_3 . Общий световой поток пропорционален сумме единичных световых потоков:

$$\Phi \sim f_1 + f_2 + f_3, \quad (8)$$

а общая мощность, потребляемая осветительной системой, пропорциональна сумме мощностей, потребляемой каждым цветным СИД при излучении единичного потока:

$$P \sim \frac{f_1}{K_1} + \frac{f_2}{K_2} + \frac{f_3}{K_3}, \quad (9)$$

где K_1, K_2, K_3 – световые эффективности цветных светодиодов (C_1, C_2, C_3).

Световая эффективность осветительной системы на базе трех цветных СИД определяется на основе соотношений (8) и (9) по уравнению:

$$K = \frac{\Phi}{P} = \frac{K_1 K_2 K_3 (f_1 + f_2 + f_3)}{f_1 K_2 K_3 + f_2 K_1 K_3 + f_3 K_1 K_2}. \quad (10)$$

Если излучения источников C_1, C_2, C_3 монохроматические, то вычисление коэффициентов L_{ir}, L_{ig}, L_{ib} значительно упрощается. В частности для источников основных цветов красного R ($\lambda_R = 700$ нм), зелёного

G ($\lambda_G = 546,1$ нм), и синего B ($\lambda_B = 435,8$ нм), коэффициенты принимают значения:

$$L_{2r} = L_{3r} = L_{1g} = L_{3g} = L_{1b} = L_{2b} = 0$$

$$L_{1r} = 243,9 \cdot 0,0041 \approx 1, \quad L_{2g} = 4,66 \cdot 2,14 \approx 1, \\ L_{3b} = 3,38 \cdot 2,95 \approx 1$$

и, следовательно, из (7) получается:

$$f_{1r} = F_R = 1, \quad f_2 = F_G = 4,5907, \quad f_3 = F_B = 0,0601$$

При известных значениях световой эффективности R , G и B СИД (60, 130, 30 лм/Вт, соответственно) общая световая эффективность согласно (10) составит примерно 105 лм/Вт, что значительно меньше световой эффективности «белых» СИД с люминофором. Вместе с тем, если в качестве зелёного СИД использовать фотолюминесцентный с люминофором, преобразующим синий свет в зелёный (световая эффективность такого СИД может достигать значения 380 лм/Вт [12]), то общая световая эффективность светодиодного кластера увеличится почти в два раза до примерно 185 лм/Вт.

РАСЧЁТ СВЕТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ 2-Х ЦВЕТНЫХ СИД

Достоинством белого кластера на основе трех СИД можно считать возможность коррекции цветности белого излучения через независимое управление световым потоком любого из трех СИД, составляющих кластер. В некоторых случаях, когда такая коррекция не является необходимой, возможна техническая реализация кластера белого излучения на основе двух СИД. В этом случае цветности излучений двух СИД должны быть взаимно-дополнительными: при расчёте осветительных систем на базе двух квазимонохроматических СИД основное внимание должно быть обращено на то, чтобы при смешении выбранных цветов C_1 и C_2 можно было получить белый цвет E с заданными координатами цветности. Это означает, что точки $C_1(r_1, g_1)$, $C_2(r_2, g_2)$ и $E(r_E, g_E)$ (рис. 4) должны находиться на одной прямой линии, и их координаты цветности связаны соотношением:

$$\frac{r_E - r_1}{r_2 - r_1} = \frac{g_E - g_1}{g_2 - g_1} \quad (11)$$

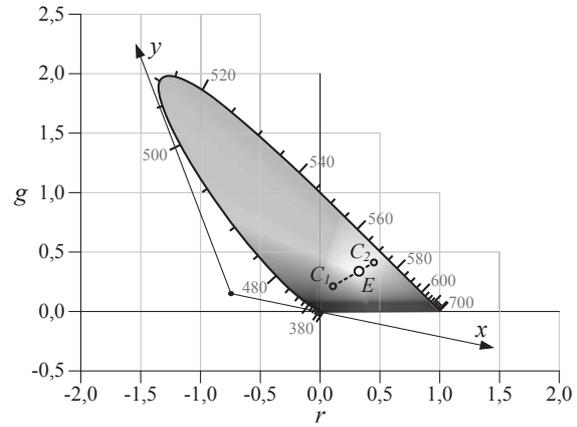


Рисунок 4.
Диаграмма цветности rg СИЕ

Световые потоки СИД должны быть обратно пропорциональны длинам отрезков EC_1 и EC_2 , т.е.

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{(r_2 - r_E)^2 + 4,5907^2 \cdot (g_2 - g_E)^2}}{\sqrt{(r_1 - r_E)^2 + 4,5907^2 \cdot (g_1 - g_E)^2}} \quad (12)$$

где коэффициент $4,5907^2$ характеризует переход от коэффициентов цветности источников C_1 и C_2 к их световым потокам.

Таким образом, формула для световой эффективности осветительной системы на базе двух цветных СИД, полученная из (10) при условии $f_3 = 0$, будет иметь следующий вид:

$$K = \frac{\Phi}{P} = \frac{K_1 K_2 (1 + \frac{f_1}{f_2})}{K_1 + K_2 \frac{f_1}{f_2}} \quad (13)$$

где отношение $\frac{f_1}{f_2}$ определяется по формуле (12). Очевидно, что выражение (13) соответствует формуле (10) для случая двух СИД:

$$K = \frac{\Phi}{P} = \frac{K_1 K_2 (1 + \frac{f_1}{f_2})}{K_1 + K_2 \frac{f_1}{f_2}} = \frac{K_1 K_2 (f_2 + f_1)}{K_1 f_2 + K_2 f_1} \quad (14)$$

РАСЧЁТ СВЕТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ n ЦВЕТНЫХ СИД

Недостатком двухцветных кластеров является ограниченная возможность управления цветностью суммарного излучения. Теоретически при изменении потоков излучения двух СИД точка цветности суммарного их излучения лежит на прямом отрезке $C_1 C_2$, который может не включать в себя точку бе-

лого цвета E , например, изначально вследствие случайных вариаций цветностей СИД, возникающих при их изготовлении, или в процессе эксплуатации в связи с изменениями режима работы (температуры и напряжения питания). В этом отношении кластеры на основе трех СИД выглядят предпочтительнее.

$$K = \frac{\Phi}{P} = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n (f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n)}{f_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n + f_2 \cdot K_1 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n + \dots + f_n \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_{n-1}} \quad (15)$$

Дополнительным преимуществом многоцветных кластеров является их более широкий цветовой охват по сравнению с трехцветными. Это дает большие возможности как для коррекции цветности суммарного белого излучения (его цветовой температуры), так и для применения таких кластеров в цветодинамических системах, в частности, для цветных дисплеев с широким цветовым охватом.

Представленные в данной работе результаты анализа световой эффективности светодиодных кластеров позволяют сделать вывод о возможности их эффективного применения в задачах создания светодиодных осветительных систем. Рассмотренная в статье методика позволяет рассчитать световую эффективность осветительных систем на базе светодиодных кластеров.

Список литературы:

1. Performance of Halogen Incandescent MR16 Lamps and LED Replacements. Caliper Benchmark Report. November 2008. URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/mr16_benchmark_11-08.pdf (дата обращения: 05.05.2016).
2. Performance of T12 and T8 Fluorescent Lamps and Troffers and LED Linear Replacement Lamps. Caliper Benchmark Report. January 2009. URL: http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-18076.pdf (дата обращения: 05.05.2016).
3. Разработка новых критериев эффективности дорожных светодиодных светильников. Барышников Н. В., Мазалов В. В., Ширанков А. Ф., Павлов В. Ю., Сафонов П. И. Наука и образование: электронное научно-техническое издание, №07, июль 2013. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/579034.html> (дата обращения: 05.05.2016).

Еще большими возможностями в отношении цветовой коррекции могут обладать кластеры с числом СИД более трех. Световая эффективность кластеров с числом СИД, равным n , на основе уравнений (8) - (10) может быть представлена как:

4. LED lighting and control systems evolve for optimal efficacy. LEDs Magazine, July/August 2011. URL: <http://www.ledsmagazine.com/articles/2011/07/led-lighting-and-control-systems-evolve-for-optimal-efficiency-magazine.html> (дата обращения: 05.05.2016).
5. Hordeski Michael F. New Technologies for Energy Efficiency. Fairmont Prerss. 2003. 376 p.
6. Perry Jeff. Designing LED Lighting Systems For Optimal Light Output. National Semiconductor. Power Electronics: [сайт]. [2011]. URL: <http://powerelctronics.com/lighting/designing-led-lighting-systems-optimal-light-output> (дата обращения: 05.05.2016).
7. Comparing White Light LEDs to Conventional Light Sources. U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy: [сайт]. [2011]. URL: http://cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/comparing_white_leds.pdf (дата обращения: 05.05.2016).
8. CITIZEN ELECTRONICS CO., LTD: [сайт]. URL: http://ce.citizen.co.jp/lighting_led/en/index.html (дата обращения: 05.05.2016).
9. OSRAM Opto Semiconductors: [сайт]. URL: http://www.osram-os.com/osram_os/ru/index.jsp (дата обращения: 05.05.2016).
10. Philips Lumileds Lighting Company: [сайт]. URL: <http://www.philipslumileds.com> (дата обращения: 05.05.2016).
11. Colorimetry: Understanding the CIE System. Edited by Janos Schanda. John Wiley & Sons, Inc. 2007. 467 p.
12. Details of the 200lm/W TLED lighting technology breakthrough unraveled [Электронный ресурс] // Philips Lumileds Lighting Company: [сайт]. URL: http://www.newscenter.philips.com/pwc_nc/main/shared/assets/nl/Newscenter/2013/LED-Lamp/Technical-backgrounder-lumen-per-watt-new.pdf (дата обращения: 05.05.2016).

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕШЕТОК– ПОЛЯРИЗАТОРОВ СООТВЕТСТВЕННО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ

ЛУКАШЕВИЧ Я.К.

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

E-mail: gipo@telebit.ru

Описаны способы улучшения оптических характеристик решеток-поляризаторов, преимущественно в коротковолновой части их рабочего диапазона, где это особенно актуально. Приведены численные значения их оптических характеристик. Результаты работы могут служить ориентиром при выборе потребителем типа поляризатора с оптимальными параметрами и стоимостью.

Ключевые слова: решетка-поляризатор, дифракционная решетка, поляризующая способность.

Идеология изготовления решеток-поляризаторов на основе дифракционных решеток впервые была предложена в 1960 г. [1]. Сущность метода состоит в нанесении отражающего металлического покрытия на верхнюю часть граней каждого из треугольных штрихов дифракционной решетки. В качестве дифракционной решетки использовалась прозрачная реплика из фторопласта. В работе [2] были представлены решетки-поляризаторы, полученные на пленочных подложках из оргстекла, фторопласта Ф-32Л, полиэтилена, а также на твердых подложках из фтористого кальция и бескислородного стекла ИКС-25.

Основными характеристиками, определяющими качество решеток-поляризаторов, являются: P – поляризующая способность, определяемая как $[\tau_{\perp} - \tau_{\parallel}] / [\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}]$, и T – коэффициент полного пропускания, определяемый как $[\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}] / 2$.

Известно, что для получения поляризации излучения, близкой к 100% необходимо установить две решетки-поляризатора друг за другом по направлению распространения излучения и с ориентированными взаимно параллельно штрихами. С целью увеличения коэффициента пропускания автором было предложено наносить две решетки на одну подложку [3]. Такие решетки-поляризаторы можно изготовить путем нарезки решеток на обеих сторонах полированной подложки из материала, прозрачного в заданной области спектра. Также их можно изготовить путем пресования полиэтиленовой пленки между двумя решетками-матрицами, нарезанными на металлическом слое, или нарезанными непосредственно на полированной поверхности металлической подложки.

С целью упрощения и удешевления изделий как одинарных, так и двойных, нами применена технология копирования

Таблица 1.
Оптические характеристики решеток-поляризаторов

Длина волны, мкм	N=1200 мм, BaF ₂ (толщина 3 мм)								
	«Двойная»			Одинарная			Две одинарные, установленные последовательно		
	τ_{\perp}	τ_{\parallel}	P	τ_{\perp}	τ_{\parallel}	P	τ_{\perp}	τ_{\parallel}	P
2	55	0,3	99	65	5	86	45	0,3	98,5
3	65	<0,1	>99,5	70	2	94	52	0,1	99,5
4	72	<0,1	>99,5	73	0,9	97	62	<0,1	>99,5
10,6	70	<0,1	>99,5	69	<0,1	>99,5	65	<0,1	>99,5

Таблица 2.
Оптические характеристики решеток поляризаторов с удвоенным числом металлических элементов на каждый из штрихов решетки

Длина волны, мкм	Фторопласт Ф-32Л								
	n=2400 мм ⁻¹			n=1200 мм ⁻¹			N=600 мм ⁻¹		
	τ_{\perp}	τ_{\parallel}	P	τ_{\perp}	τ_{\parallel}	P	τ_{\perp}	τ_{\parallel}	P
1	62	0,3	99	38	2,0	90	-	-	-
1,5	83	0,2	99,5	58	0,3	99	42	0,3	98
2	86	<0,1	>99,5	60	0,2	99	58	0,2	99
5	85	<0,1	>99,5	68	<0,1	>99,5	67	<0,1	>99,5

решеток на прозрачную подложку. Это актуально для получения решеток-поляризаторов для учебных целей на стеклянных подложках, а также на кварцевых подложках для применения их в области прозрачности этих материалов. Для этого применяются копирующие полиэфирные и эпоксидные смолы, которые в тонких слоях прозрачны в достаточно широкой области спектра. В табл. 1 приведены характеристики «двойной» решетки-поляризатора, изготовленной на подложке из фтористого бария, обладающего высоким пропусканием в ближней и средней ИК областях спектра, вплоть до границы прозрачности, где τ_{\perp} и τ_{\parallel} – коэффициенты пропускания для излучения, поляризованного перпендикулярно и параллельно штрихам решетки, P – поляризующая способность поляризатора.

Здесь же, для сравнения, приведены характеристики одинарной решетки-поляризатора и двух решеток-поляризаторов, установленных последовательно друг за другом.

Для улучшения поляризационных характеристик в коротковолновой части рабочего диапазона длин волн была предложена конструкция решеток-поляризаторов, у которых отражающее покрытие расположено на каждой из обеих граней штрихов решетки [4]. Также был предложен способ осуществления такой конструкции решеток-поляризаторов [5]. Сущность способа заключается в нанесении отражающего покрытия на решетку-матрицу, получении с нее реплики из прозрачного в заданной области спектра материала, содержащей отражающее покрытие на одной из граней штрихов, и последующем нанесении отражающего покрытия на грани штрихов до этого свободных от него. При этом перед нанесением отражающего покрытия на решетку-матрицу на нее наносился разделительный слой, который впоследствии удалялся.

С целью повышения технологичности было предложено наносить дополнительно, непосредственно перед формованием реплики, защитный слой из материала,

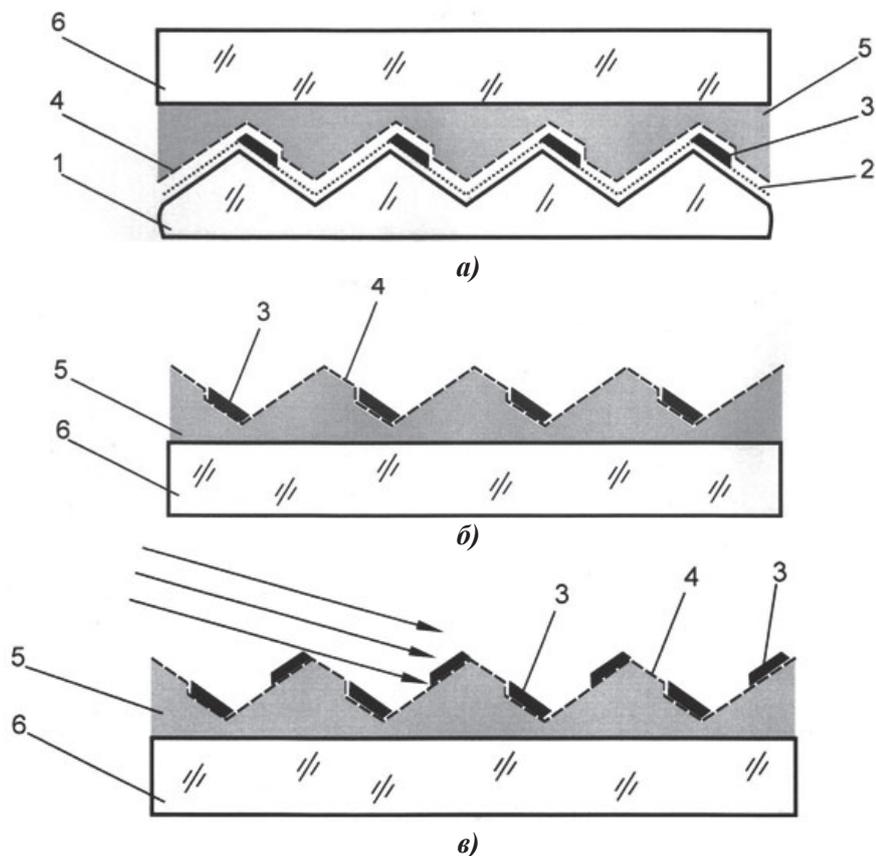


Рисунок 1.

Схема получения решетки-поляризатора с удвоенным числом металлических элементов на каждом из штрихов прозрачной дифракционной решетки: 1 – решетка-матрица; 2 – разделительный слой; 3 – металлическое покрытие; 4 – защитное покрытие; 5 – прозрачная копия; 6 – прозрачная подложка решетки-поляризатора. Стрелками указано направление нанесения покрытия

прозрачного в заданной области спектра, защищающий отражающее покрытие от разрушения при копировании, где в большинстве случаев используются агрессивные растворители, неблагоприятно воздействующие на целостность геометрии металлического покрытия [5]. Это заметно повысило технологичность за счет выхода годных изделий. В табл. 2 приведены характеристики решеток-поляризаторов на фторопластовой подложке, с различными частотами штрихов, где τ^{\perp} и τ^{\parallel} – коэффициенты пропускания для излучения поляризованного перпендикулярно и параллельно штрихам решетки соответственно, P – поляризующая способность.

Следует отметить, что коротковолновой границей для решетки-поляризатора принято считать длину волны излучения, при

которой поляризующая способность достигает 97 %. При этом для решеток-поляризаторов на основе нарезных решеток это значение достигается, когда отношение длины волны к шагу решетки приблизительно равно 4. На рис.1 приведена схема последовательных операций этого способа.

Благоприятным свойством решеток-поляризаторов является их способность работать как на прохождение, так и на отражение, при этом излучение, поляризованное перпендикулярно штрихам решетки, проходит через нее, а поляризованное параллельно штрихам, зеркально отражается. Очевидно, что для эффективного отражения поверхность решетки-поляризатора должна быть достаточно плоской.

Для решеток-поляризаторов на твердых



Рисунок 2.

Решетки-поляризаторы на пленочной полиэтиленовой подложке в обычной оправе (слева) и модифицированной (справа)

подложках это достигается при обработке подложки.

Для решеток-поляризаторов на пленочных подложках необходимы дополнительные меры. Это особенно актуально для решеток-поляризаторов на полиэтиленовых подложках.

Известно, что полиэтилен обладает высоким пропусканием вплоть до СВЧ диапазона длин волн. Альтернативой в среднем диапазоне длин волн могут служить подложки из кристаллов йодисто-бромистого таллия или йодистого цезия. Однако их применение нежелательно из-за высокой стоимости материала, а также их высокой токсичности.

Нами разработаны оправы и способ крепления в них решеток-поляризаторов на пленочных подложках, обеспечивающие достаточную их плоскостность. При этом размеры оправ соответствуют европей-

ским стандартам. Учтено также то, что полиэтилен не приклеивается промышленно выпускаемыми клеями.

На рис. 2 приведены фотографии решеток-поляризаторов из полиэтилена в обычной оправе и модифицированной оправе (справа).

Результаты работы показывают возможность выбирать оптимальную конструкцию и оптимизировать технологию изготовления решеток-поляризаторов в зависимости от области их применения и лимита стоимости изделий.

Список литературы:

1. G.R.Bird and Parrish. The Wire Grid as a Near-Infrared Polariser.-J.Opt.Soc. Am., 1960, v. 50, №9, p.886-891.
2. Яковлев Э.А., Герасимов Ф.М. Поляризаторы инфракрасного излучения на основе прозрачных дифракционных решеток. – Опт.-мех. пром-сть, 1964, №10, с.28-34.
3. Решетка-поляризатор: А.С.1040933 СССР / Я.К.Лукашевич – №3310997/18-10; Заявлено 3.07.81г., Оpubл. «Авторские свидетельства и патенты ранее не публиковавшиеся, №18, 2002г.».
4. Решетка-поляризатор: А.С. 447659 СССР / Я.К.Лукашевич, С.А.Стрежнев, Е.Ф.Дедюхин. – №1861073/18-10; Заявл. 22.12.72г.; Оpubл. 25.10.74г. – Бюл.№39 – 2с.
5. Способ изготовления решеток- поляризаторов: А.С.599242 СССР / Я.К.Лукашевич, С.А.Стрежнев, В.В.Куинджи – №2355922/10, Заявл. 10.05.76; Оpubл. 25.03.78. – Бюл. №11 – 3с.

НОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ПРИБОРЫ НАБЛЮДЕНИЯ

ВОЛКОВ В.Г., СЛУЧАК Б.А.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «ТАЛОС»

E-mail: volkvik2009@yandex.ru, sba19@mail.ru

В статье рассматриваются новые лазерные приборы наблюдения: активно-импульсные телевизионные приборы ночного видения, антиснайперские лазерные приборы разведки и целеуказания. Все эти приборы имеют исполнение либо в виде удерживаемых в руках, либо в виде мобильных и стационарных устройств. Рассматривается также многоспектральный комплекс круглосуточного и всепогодного видеонаблюдения. Показана перспективность таких лазерных приборов благодаря их многофункциональности и высоким параметрам.

Ключевые слова: дальность обнаружения, дальность распознавания, угол поля зрения, точность измерения дальности и координат.

В настоящее время широкое распространение получили активно-импульсные телевизионные приборы ночного видения (АИ ТВ ПНВ) [1 – 3]. Они обладают по сравнению с традиционными низкоуровневыми ТВ системами (НТВС) рядом значительных преимуществ:

- повышение дальности обнаружения и распознавания объектов наблюдения,
- возможность работы при пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад, пыльная или песчаная буря и др.) и при воздействии мощных локальных световых помех (излучение прожекторов, фар встречного транспорта, пламя трассеров, вспышки выстрелов, взрывов, пламя пожаров и др.),
- точное измерение дальности,
- возможность обнаружения оптических или оптико-электронных приборов противника по бликам отраженного зондирующего лазерного излучения,
- возможность наблюдения малоконтрастных или замаскированных объектов.

Распространение получили также лазерные антиснайперские приборы разведки и целеуказания, которые также обеспечивают обнаружение оптических или оптико-электронных приборов противника по бликам отраженного зондирующего лазерного излучения.

Известно достаточно большое количество моделей АИ ПНВ, АИ ТВ ПНВ и лазерных

антиснайперских приборов [1 – 3]. Но все они обладают сравнительно низкими параметрами и ограниченными функциональными возможностями, не удовлетворяющими возросшим современным требованиям заказчиков.

В связи с этим в данной статье предлагаются новые лазерные приборы наблюдения, преодолевающие эти недостатки. В настоящее время в ООО «ТАЛОС» самостоятельно или совместно с заводом «Юпитер» и ОКБ «АСТРОН» разработан целый ряд АИ ТВ ПНВ. Они могут быть в различном исполнении: удерживаемые в руках (например, прибор «Призрак-М») либо мобильного и стационарного базирования (например, прибор «Призрак-С», модель TLS2503). На их основе осуществляется разработка новых АИ ТВ ПНВ: удерживаемых в руках («Призрак-Р»), а также мобильного и стационарного базирования («Призрак-СМ»).

Основные параметры этих приборов приведены в табл. 1. На рис. 1 показан внешний вид приборов класса «Призрак». Рис. 2 - 5 иллюстрируют широкие возможности таких АИ ТВ ПНВ по сравнению с НТВС.

На рис. 2 представлен типичный характер изображения в лазерный прибор класса «Призрак» при его работе в АИ режиме. Если в пределы подсвечиваемого по глубине пространства не попадает фон, то видны светлые изображения объекта на темном фоне (поло-



Рисунок 1.
Внешний вид прибора наблюдения
класса «Призрак»

жительный контраст). Если фон попадает в эти пределы, то видно изображение темного силуэта на светлом фоне (отрицательный контраст). На рис. 2 слева видно изображение группы бойцов спецподразделений при их наблюдении в положительном контрасте и одиночной фигуры человека, наблюдаемого в отрицательном контрасте. На рис. 2, справа видно изображение бойца спецподразделения в камуфляжной форме. В обычные НТВС такая фигура не видна.

На рис. 3 показано слева окно, освещенное солнцем, наблюдаемое в НТВС. Справа – то же окно, наблюдаемое в прибор класса «Призрак», работающий в АИ режиме. Ясно видна фигура человека, не просматриваемая в НТВС.

На рис. 4 представлен характер наблюдения стекол автомашины для обычной НТВС (слева) и при работе прибора класса «Призрак» в АИ режиме (справа). Видно, что внутренняя часть автомашины в НТВС не видна, в то время как в прибор класса «Призрак» она хорошо просматривается.

Прибор разведки и целеуказания «Призрак-Р» обеспечивает следующие функциональные возможности:

- круглосуточность видения в любых погодных условиях,
- обнаружение встречного оптического или оптико-электронного наблюдения и прицеливания,
- защита от встречных засветок и световых помех,
- отдельное наблюдение объектов по глубине просматриваемого пространства, расположенных на разных расстояниях от прибора,
- отдельное наблюдение малоконтраст-

- ных объектов и окружающего фона,
- подсвет затененных пространств,
- видение через тонированные или бликующие стекла зданий и автомобилей,
- фотографирование и видеозапись наблюдаемого изображения,
- точное измерение дальности до объекта наблюдения,
- точное измерение собственных координат и координат объекта наблюдения,
- дистанционное управление и передача данных,
- универсальность электронного питания.

Областью применения прибора «Призрак-Р» является разведка и целеуказание, охрана VIP, охраняемых объектов, границ, территорий, акваторий и воздушного пространства. Областью применения прибора «Призрак-Р» является также повышение безопасности вождения автотранспортных средств и судов, пилотирования летательных аппаратов в условиях пониженной естественной освещенности (сумерки, ночь, полная темнота), а также в условиях пониженной прозрачности атмосферы и при воздействии световых помех, в том числе при использовании транспортных средств, осуществляющих патрулирование зон ответственности.

Прибор «Призрак-Р» отличается от своего прототипа – прибора «Призрак-М» расширенными функциональными возможностями, более высокими значениями параметров и уровнем защиты от воздействия внешней среды (см. табл. 1).

Прибор «Призрак-Р» содержит:

- ТВ визирный канал,
- лазерный канал обнаружения встречного наблюдения и прицеливание, а также точного измерения дальности,
- цифровой магнитный компас,
- ГЛОНАСС – GPS приемник,
- встроенное видеозаписывающее устройство,
- проводной и беспроводной канал внешнего управления и передачи данных,
- возможность подключения внешнего питания,
- возможность вывода видеосигнала, в том числе в персональный компьютер.

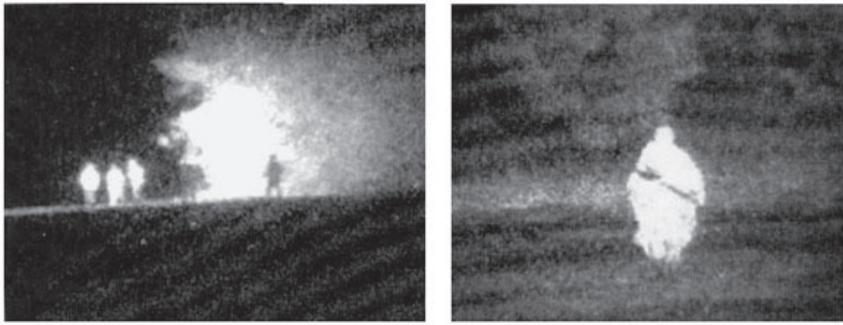


Рисунок 2.

Типичный характер изображения в лазерный прибор класса «Призрак» при его работе в активно-импульсном режиме. Слева видны фигуры людей при их наблюдении в положительном контрасте, справа фигура человека, наблюдаемого в отрицательном контрасте

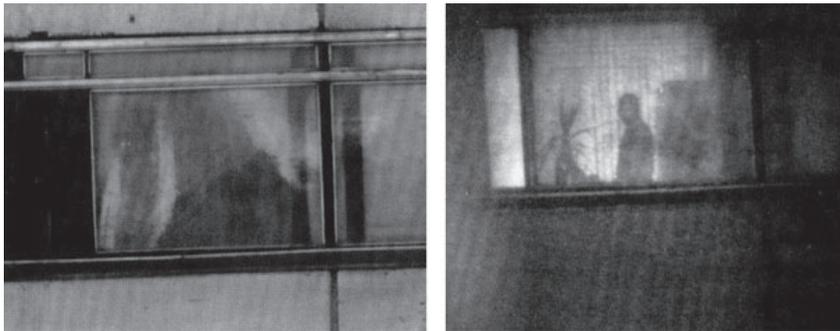


Рисунок 3.

Характер наблюдения окна здания для обычной низкоуровневой ТВ системы (слева) и при работе прибора класса «Призрак» в активно-импульсном режиме (справа)



Рисунок 4.

Характер наблюдения стекол автомашины для обычной низкоуровневой ТВ системы (слева) и при работе прибора класса «Призрак» в активно-импульсном режиме (справа)

Прибор «Принц-Р» (рис. 5) предназначен для наблюдения окружающего пространства, обнаружения оптических и оптико-электронных средств противника, целеуказания и точного измерения дальности до объектов наблюдения. Он может быть использован для охраны VIP, охраняемых объектов, границ, территорий, акваторий и воздушного пространства, в том числе при использовании

транспортных средств, осуществляющих патрулирование зон ответственности.

На рис. 6 показана возможность обнаружения бликов от оптических средств (в частности, прибора ПСО-1) с помощью прибора «Принц-Р».

Прибор «Принц-Р» отличается от прототипа – прибора «ДОН-800» расширенными функциональными возможностями, более

Таблица 1.

Основные параметры активно-импульсных приборов наблюдения

Тип АИ прибора	Удерживаемый в руках		Мобильного и стационарного базирования	
	ООО НПП «ТАЛОС»	ООО НПП «ТАЛОС»	ООО НПП «ТАЛОС»	ООО НПП «ТАЛОС», ОАО завод «Юпитер», ОКБ «Астрон»
Фирма-производитель	ООО НПП «ТАЛОС»	ООО НПП «ТАЛОС»	ООО НПП «ТАЛОС»	ООО НПП «ТАЛОС», ОАО завод «Юпитер», ОКБ «Астрон»
Модель	«Призрак-М» «Призрак-С»	«Призрак-Р» «Призрак-СМ»	«Призрак-С» (модель TLS2503)	«Призрак-СМ»
Габариты, мм - длина - ширина - высота	225 145 70	200 150 70	493 175 168	350 250 168
Масса с батареей питания, кг	1,7	1,7	6,5	6
Энергопотребление, Вт	-	-	60 (включая подогрев)	70 (включая подогрев)
Время непрерывной работы от батареи (встраиваемой или внешней), ч	3	3	3	3
Внешнее управление	RS485	RS232/RS485/ Ethernet	RS485	RS232/RS485/ Ethernet
Внешний видеовыход	CCIR	CCIR/BT656	CCIR	CCIR/BT656
Угол поля зрения, град.	5,5x4,1	5,5x4,1/ 9,7x7,3	5,5x4,1	5,5x4,1/ 9,7x7,3
OLED дисплей	Черно-белый 800x600 эл.	Цветной 800x600 эл.	Черно-белый 800x600 эл.	Цветной 800x600 эл.
Дальность обнаружения ПСО-1, м	1200	1300	2500	3500
Дальность распознавания ростовой фигуры человека, м	600	700	700	700
Дальность распознавания танка, м	900	1000	2500	3500
Точность измерения дальности, м	± 10	± 10	± 10	± 10
Регулировка мощности излучения подсвета	1; ½; 1,4/; 1/8; 1/16	1; ½; 1,4/; 1/8; 1/16; 1/32	1; ½; 1,4/; 1/8; 1/16	1; ½; 1,4/; 1/8; 1/16; 1/32
Система бесперебойного питания	нет	есть	нет	есть
Индикация наработки прибора и состояния батареи питания	нет	есть	нет	есть
Уровень защиты от воздействия внешней среды	IP54	IP67	IP54	IP67
Сертификация	EMC Laser Safety	Все виды	EMC Laser Safety	Все виды
Встроенный цифровой магнитный компас	нет	есть	нет	есть

Продолжение таблицы 1.

Встроенный GPS/ГЛОНАСС приемник	нет	есть	нет	есть
Автоматическое обнаружение	нет	есть	нет	есть
Встроенное фото- и видеозапись	нет	есть	нет	есть
Беспроводная передача данных	нет	есть	нет	есть
Рабочая внешняя освещенность, лк	0 – 8x10 ⁴	0 – 8x10 ⁴	0 – 8x10 ⁴	0 – 10 ⁵
Диапазон рабочих температур, °С	(-25) – (+40)	(-40) – (+60)	(-40) – (+60)	(-50) – (+60)
Глубина зоны подсвета, м	10; 20, 50; 100; 200; 500	10; 20, 50; 100; 200; 500	10; 20, 50; 100; 200; 500	10; 20, 50; 100; 200; 500

Таблица 2.

Основные параметры лазерных приборов разведки и целеуказания, а также лазерных приборных комплексов дальнего видеонаблюдения

Тип прибора	Антиснайперские приборы разведки и целеуказания			Комплексы дальнего видеонаблюдения	
	удерживаемый в руках	удерживаемый в руках	стационарного и мобильного применения	стационарного и мобильного применения	стационарного и мобильного применения
Фирма-изготовитель	ООО НПП «ТАЛОС»	ООО НПП «ТАЛОС»	ООО НПП «ТАЛОС»	Obzerv (Канада)	ООО НПП «ТАЛОС», ОАО завод «Юпитер», ОКБ «Астрон»
Модель	«ДОН-800»	«Принц-Р»	«Принц-СМ»	ARGC-2400	«Концепт-3СМ»
Общие данные					
Габариты, мм					
- длина	200	170	170	560	550
- ширина	172	140	140	520	500
- высота	76	70	70	370	360
Масса с батареей питания, кг	1,8	1,9	4	55	42
Рабочий диапазон температур, °С	(-30) – (+50)	(-40) – (+50)	(-40) – (+50)	(-20) – (+40)	(-40) – (+50)
Защищенность от внешних воздействий	IP54	IP67	IP67	-	IP67
Рабочая внешняя освещенность, лк	10 ⁻² – 6x10 ⁴	10 ⁻² – 8x10 ⁴	10 ⁻² – 8x10 ⁴	-	0 – 10 ⁵
Вид управления	RS485	RS485 Ethernet	RS485/ Ethernet	RS232/ Ethernet	RS232/ Ethernet
Внешний видеовыход	CCIR	CCIR/BT656	CCIR	CCIR/BT656	CCIR/BT656
Время работы от батареи питания, ч	2	3	5	-	-
Дальность обнаружения ПСО-1, м	800	1000	1000	-	-

Продолжение таблицы 2.

Напряжение, В	=12 – 16,8 или ~ (100 – 240, 50 – 60 Гц)	=12 – 16,8 или ~ (100 – 240, 50 – 60 Гц)	=12 – 16,8 или ~ (100 – 240, 50 – 60 Гц)	= 9 – 15 или ~ (100 – 240, 50 – 60 Гц)	=27 или ~ (100 – 240, 50 – 60 Гц)
Энерго- потребление, Вт	6	6	6	350	250
Опции					
Цифровой магнитный компас, инклинометр	нет	есть	есть	есть	есть
GPS/ ГЛОНАСС приемник	нет	есть	есть	нет	есть
Встроенная фото- и видеозапись	нет	есть	есть	нет	есть
Дистанционная передача данных	проводная	проводная и беспроводная	проводная и беспроводная	проводная	проводная и беспроводная
Тепловизор	нет	нет	нет	внешний	встроенный
Дальномер	нет	есть	есть	нет	есть
Тепловизионный канал					
Тип фотоприем- ного устройства (ФПУ)	-	-	-	-	микроболо- метрическая матрица
Рабочая область спектра, мкм	-	-	-	-	7 – 14
Чувствитель- ность, мк	-	-	-	-	< 40
Число пикселей в ФПУ	-	-	-	-	640x480
Угол поля зрения, град., узкое/широкое	-	-	-	-	2,3x1,7/ 12,4x9,3
Фокусное расстояние объектива, мм	-	-	-	-	275/50
Стандарт видеосигнала	-	-	-	-	PAL
Дальность распознавания ростовой фигуры человека, м	-	-	-	-	3000
Дальность распознавания танка, м	-	-	-	-	8000
Активно-импульсный канал обнаружения бликов					
Количество лазеров	2	1	1	-	-
Класс лазерной опасности	1М	1М	1М	-	-
Угол поля зрения, мрад. x град.	1x4	1x3	1x3	-	-

Продолжение таблицы 2.

Точность определения координат цели, мрад x град.	1x0,17	1X0,17	1x0,17	-	-
Точность измерения дальности, м	± 5	± 5	± 5	-	-
Скорость горизонтального сканирования, град/с	10	10	20	-	-
Эффективность работы в тумане	высокая	высокая	высокая	высокая	высокая
Дальность обнаружения ПСО-1, м	800	1000	1000	-	-
Время обнаружения, с	-	0,04	0,04	-	-
Телевизионный визирный канал					
Угол поля зрения, град.	8x6	8x6	8x6	(0,12x0,09)x (0,46 – 0,34)	1,5x1,1 44x33
Увеличение, крат.	-	3,5	3,5	78 - 312	30
Внешний видеовыход	CCIR	CCIR/BT650	CCIR/BT650	CCIR/BT650	CCIR/BT650
OLED дисплей	Черно-белый, разрешение 800x600 эл.				
Минимальная рабочая освещенность, лк	-	-	-	1,5 - 2	0,1
Способ индикации обнаружения бликов	видео	видео, звуковой	видео	видео	видео
Дальномерный канал					
Измеряемая дальность, м	-	-	-	-	50 – 10 ⁴
Длина волны, мкм	-	-	-	-	1,54
Частота измерений, Гц	-	-	-	-	2
Низкоуровневый защищенный пассивный/активно-импульсный ТВ канал					
Дальность распознавания ростовой фигуры человека, м	-	-	-	8000	9000
Дальность распознавания танка, м	-	-	-	15000	16000
Угол поля зрения, град., узкое/широкое	-	-	-	ТВ (0,15x0,11) – (0,61x0,46)	ТВ (0,15x0,11); (0,61x0,46)
Угол подсвета, град.	-	-	-	(0,15x0,11) – (0,61x0,46)	(0,15x0,11); (0,61x0,46)
Длина волны подсвета, мкм	-	-	-	0,808 – 0,86	0,808 – 0,806
Диапазон внешней освещенности, лк	-	-	-	-	0 - 10 ⁵
Глубина зоны подсвета, м	-	-	-	30 - 1000	10 - ∞
Мощность излучения импульса подсвета, Вт	-	-	-	5250	16000
Средняя мощность излучения подсвета, Вт	-	-	-	16	16
Частота подсвета, Гц	-	-	-	30	10



Рисунок 5.

Внешний вид прибора наблюдения «Принц-Н»

высокими значениями параметров и более высоким уровнем защиты от воздействий внешней среды. Основные параметры приборов «ДОН-800» и «Принц-Р» приведены в табл. 2. Там же приведены параметры прибора «Принц-СМ» стационарного и мобильного базирования. Он обладает теми же функциональными возможностями, что и прибор «Призрак-СМ» и теми же преимуществами по сравнению с прибором «ДОН-800», что и прибор «Принц-Р».

В табл. 2 приведены также параметры перспективного приборного комплекса дальнего видеонаблюдения «Концепт-3СМ» и его прототипа – комплекса «ARGC-2400» фирмы Obzerv (Канада). Комплекс «Концепт-3СМ» содержит:

- тепловизионный (ТВП) канал,
- АИ ТВ канал,
- лазерно-дальномерный канал,
- систему видеоналитики,
- навигационный модуль,
- систему управления,
- поворотное устройство,
- систему передачи данных,
- систему электропитания.



Рисунок 6.

Характер наблюдения бликов от оптического прицела ПСО-1, наблюдаемого в прибор «Принц-Р»

В качестве примера возможного конструктивного исполнения прибора «Концепт-3СМ» на рис. 7 представлен внешний вид многофункционального многоканального прибора наблюдения FLIR серии HCR фирмы FLIR Systems в переносном исполнении [4]. На рис. 8 показан вариант исполнения комплекса «Концепт-3СМ» в мобильном и в стационарном исполнении по типу конструкции многоканального прибора наблюдения «АВАТАР» фирмы FLIR Systems в переносном исполнении [5]. На рис. 9 представлен вариант исполнения комплекса «Концепт-3СМ» в стационарном исполнении по типу конструкции поворотного многоканального прибора наблюдения «БРОНКО» фирмы FLIR Systems. [6].

ТВП канал может использовать различные фотоприемные устройства, которые работают в области спектра либо 2 – 5 мкм, либо 8 – 12 мкм. Выбор рабочего спектрального диапазона определяется условиями применения ТВП канала. Диапазон спектра 2 – 5 мкм более эффективен при работе в условиях морского тумана, разряженной атмосферы и в условиях пустыни. Диапазон спектра 8 – 12 мкм целесообразно использовать при работе в приземных слоях атмосферы в условиях естественных природных температурных контрастов.

В отличие от прототипа «ARGC-2400» комплекс «Концепт-3СМ» содержит ТВП канал и лазерно-дальномерный канал. В приборе «ARGC-2400» используется импульсный лазерный осветитель на основе мощной решетки лазерных диодов. Он обладает значительными массой и габаритами. В комплексе



Рисунок 7.

Вариант исполнения комплекса «Концепт-3СМ» в переносном исполнении



Рисунок 8.

Вариант исполнения комплекса «Концепт-3СМ» в мобильном и в стационарном исполнении

«Концепт-3СМ» используется импульсный лазерный осветитель, выполненный по схеме группового модуля [3]. Он состоит из нескольких стандартных модулей. Каждый из них состоит из объектива формирования излучения и сравнительно маломощной решетки лазерных диодов. Оптические оси всех модулей взаимно параллельны, так что их излучение суммируется в едином угле подсвета, равном углу подсвета одного модуля. Такое исполнение осветителя позволяет по сравнению с осветителем прототипа резко снизить массу, продольные габариты и стоимость осветителя. В приборе «ARGC-2400» используется сложный и дорогостоящий объектив-трансфокатор с плавно изменяемым фокусным расстоянием. В приборе «Концепт-3СМ» вместо этого используются афокальные оптические насадки с дискретно изменяемым увеличением 2х и 4х как для осветителя, так и для приемного канала. Это позволяет упростить прибор и снизить его стоимость по сравнению с прототипом. Вместе с тем по дальности распознавания и идентификации прибор «Концепт-3СМ» не уступает прототипу «ARGC-2400», который в настоящее время занимает пока еще доминирующее положение на мировом рынке.

Комплекс «Концепт-3СМ» предназначен для всепогодного и круглосуточного наблюдения наземного, надводного и воздушного пространства, обнаружения, распознавания и идентификации движущихся малоразмерных объектов, а также для целеуказания и точного измерения дальности и координат. Комплекс используется как составная часть системы обеспечения безопасности важных объектов, границ, территорий и воздушного пространства. Комплекс используется в ка-



Рисунок 9.

Вариант исполнения комплекса «Концепт-3СМ» в стационарном исполнении

честве системы дальнего круглосуточного видения на транспортных средствах, включая бронемашину и суда. Комплекс может быть использован на летательных аппаратах (в первую очередь на вертолетах) для повышения безопасности полетов за счет своевременного обнаружения проводов ЛЭП и склонов гор при полетах в условиях пониженной прозрачности атмосферы и ночью.

В комплексе объединяются и представляются на едином ТВ мониторе изображения всех каналов в удобной для оператора форме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, описанные выше лазерные приборы наблюдения и многоканальный комплекс на их основе обладают высокими параметрами, многофункциональностью, круглосуточностью и всепогодностью работы. Это открывает новые возможности их применения в современной технике.

Список литературы:

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. Москва: Новости, 2009, 840 С.
2. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. Москва: Техносфера, 2014, 840 С.
3. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Основы улучшения видимости в сложных условиях. Москва: Недра-Бизнесцентр, 1999, 286 С.
4. Многоканальный прибор наблюдения FLIR HCR фирмы FLIR Systems. // Проспект фирмы FLIR Systems. США, 2014.
5. Многоканальный прибор наблюдения «АВАТАР» фирмы FLIR Systems. // Проспект фирмы FLIR Systems. США, 2014.
6. Поворотный многоканальный прибор наблюдения «АВАТАР» фирмы FLIR Systems. // Проспект фирмы FLIR Systems. США, 2014.

СПОСОБ ЦЕНТРИРОВАНИЯ В ОПРАВЕ ЛИНЗ, РАБОТАЮЩИХ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

ДЬЯКОВА И.И.

АО «Швабе - Приборы», г. Новосибирск

E-mail: post@tochpribor.com

В статье рассмотрена технология и устройство для центрирования в оправе линз, работающих в инфракрасной области спектра.

Ключевые слова: центрирование, инфракрасная область спектра, автоколлимационное изображение.

В последнее время всё более актуальной становится необходимость использования приборов, работающих в инфракрасной области спектра в различных сферах обеспечения жизнедеятельности (охранных системах, медицине, коммунальных сферах, приборостроении и др.).

Это в свою очередь приводит к постановке задачи проектирования и изготовления оптических систем для ИК – диапазона.

При проектировании инфракрасных систем визуализации, т.е. систем принимающих сигналы в ИК - области спектра и преобразующих их в видимые изображения (тепловизионных приборов) ставятся следующие требования: обеспечение требуемого уровня сигнала в виде потока или облучённости на приёмнике излучения, обеспечения высоких энергетических параметров тепловизионных приборов, влияющих на дальность их применения, повышение требования к однородности освещённости, создаваемой объективом в плоскости чувствительного слоя приёмника, а также создание изображения требуемого качества.

Эффективность решения этих требований определяется достигнутой в оптической системе высокой разрешающей способностью, необходимой для совместной работы с микроболометрической матрицей (МБМ) в условиях минимизации размеров пикселя

чувствительной площадки МБМ (чувствительного элемента), сравнимым с дифракционным кружком Эри.

В современных МБМ размер пикселя составляет 0,025x0,025 мм и менее. Данное условие влечёт за собой требование обеспечения более высокой точности центрирования линз, составляющих конструкцию объектива тепловизионного прибора.

Линзы объективов, работающих в инфракрасной области спектра с МБМ, чувствительными в длинноволновой области спектра (8-14) мкм, изготавливаются из германия, бескислородного стекла ИКС, кремния и других материалов, непрозрачных в видимой области спектра.

В настоящее время для центрирования линз в оправе используют способ, основанный на контроле центрирования двух поверхностей линзы, одна из которых контролируется сквозь материал линзы, прозрачный в видимой области спектра [1]. Центрирование производится с помощью центрирующего патрона со сдвиговой и поворотной частями, закреплённого в шпинделе токарного станка, и автоколлимационного микроскопа, установленного на задней бабке станка. Указанный способ заключается в совмещении центров кривизны двух поверхностей линзы, закреплённой в оправе с осью вращения шпинделя

токарного станка при последующей обработке и подрезке наружной цилиндрической и двух торцевых поверхностей оправы. Линза устанавливается так, чтобы центр кривизны поверхности линзы, ближайшей к автоколлимационному микроскопу, лежал в одной плоскости с центром кривизны поворотной части патрона. Это совпадение обеспечивают за счет выбора длины технологической части оправы.

Указанный способ не может быть использован для центрирования линз, непрозрачных в видимой области спектра, т.к. одна из поверхностей линзы должна контролироваться сквозь материал линзы.

Для центрирования линз, непрозрачных в видимой области спектра, в производстве применяют способ с использованием двух автоколлимационных микроскопов, один из которых установлен на задней бабке токарного станка, другой на передней бабке станка. Применение двух автоколлимационных микроскопов, позволяет получать автоколлимационные изображения центров кривизны от наружных поверхностей центрируемой линзы без учёта хода лучей через материал, непрозрачный в видимом спектральном диапазоне. Данный способ является достаточно трудоёмким.

Центрируемую линзу закрепляют в центрирующем патроне станка так, чтобы центр кривизны базовой поверхности линзы совпадал с центром качания чашки центрирующего патрона станка, затем подвижками оправы в патроне при контроле автоколлимационным микроскопом, установленным на задней бабке станка выставляют автоколлимационное изображение центра кривизны поверхности линзы, ближайшей к автоколлимационному микроскопу на ось вращения шпинделя станка.

Затем разворотом чашки центрирующего патрона станка при контроле автоколлимационным микроскопом, расположенным на передней бабке токарного станка вы-

ставляют автоколлимационное изображение центра кривизны поверхности линзы ближайшей к микроскопу на ось вращения шпинделя станка, после чего обрабатывают торцевые и цилиндрические поверхности оправы.

Указанный способ имеет следующие недостатки:

1. Необходимо повторное центрирование поверхностей линзы, т.к. автоколлимационное изображение поверхности, находящейся перед автоколлимационным микроскопом, закреплённым в передней бабке станка, приводит к несовпадению автоколлимационной точки центрируемой поверхности, наблюдаемой в микроскоп, установленный на задней бабке станка. Вследствие чего, смещение поворотной части патрона при центрировании второй поверхности линзы приводит к смещению автоколлимационной точки первой центрируемой поверхности от оси вращения шпинделя станка.

2. Способ технологически трудоёмок, т.к. требуется выставление автоколлимационных микроскопов с высокой точностью соосности.

Для получения высокой точности центрирования линз, составляющих конструкцию объектива тепловизионного прибора с желаемыми характеристиками, требуется решить задачу с получением следующих технических результатов: повышение точности центрирования линз и снижение трудоёмкости процесса центрирования.

Для решения поставленной задачи необходимо создание способа центрирования в оправе линз, работающих в инфракрасной области спектра.

Способ центрирования в оправе линз, работающих в инфракрасной области спектра включает установку линзы в оправу, центрирование её видимой поверхности в центрирующем патроне токарного станка путём выставления автоколлимацион-

ного изображения её центра кривизны на ось вращения шпинделя токарного станка перемещением поворотной сферической части патрона станка и центрирование её невидимой поверхности с помощью вспомогательной линзы, изготовленной из прозрачного в видимой области спектра материала, поверхность которой, ближайшая к автоколлимационному микроскопу, имеет радиус, равный радиусу невидимой поверхности линзы. Сначала центрируют ближайшую к автоколлимационному микроскопу поверхность вспомогательной линзы путём выставления автоколлимационного изображения её центра кривизны на ось вращения шпинделя станка поперечным смещением сдвиговой части патрона перпендикулярно оси вращения шпинделя, а затем центрируют видимую поверхность линзы и обрабатывают торцевые и цилиндрическую поверхности оправы линзы.

В качестве вспомогательной линзы используют линзу-свидетель, выполненную со сквозным отверстием в центре. Линзу-свидетель закрепляют перед центрируемой линзой, соосно с ней, в насадке, установленной в оправе линзы так, чтобы центр кривизны ближайшей к автоколлимационному микроскопу поверхности линзы-сви-

детеля был совмещён с центром кривизны поворотной части патрона, при этом центрирование её ближайшей к автоколлимационному микроскопу поверхности приводит к самоцентрированию невидимой поверхности линзы. Видимую поверхность линзы центрируют через отверстие в линзе-свидетеле, после чего извлекают насадку с линзой - свидетелем из оправы линзы.

Линза-свидетель может быть выполнена из стекла марки К8, ТФ10 и др. по ГОСТ 3514-94, или из полимера, например, из марок КОС55, MR7 (Корея) и др. или полиметилметакрилата (ПММА), т.к. показатель преломления материала линзы-свидетеля не учитывается, поскольку автоколлимационное изображение получают без учёта хода луча через материал линзы-свидетеля.

Предлагаемый способ реализуется с помощью, представленного на чертеже устройства для центрирования в оправе линз, работающих в инфракрасной области спектра.

Устройство рис. 1 содержит центрирующий патрон 1 токарного станка (на чертеже не показан), в котором через переходную оправку 2 закреплена центрируемая линза 3 в оправе 4, зажимное резьбовое кольцо 5, насадку 6 с линзой-свидетелем 7,

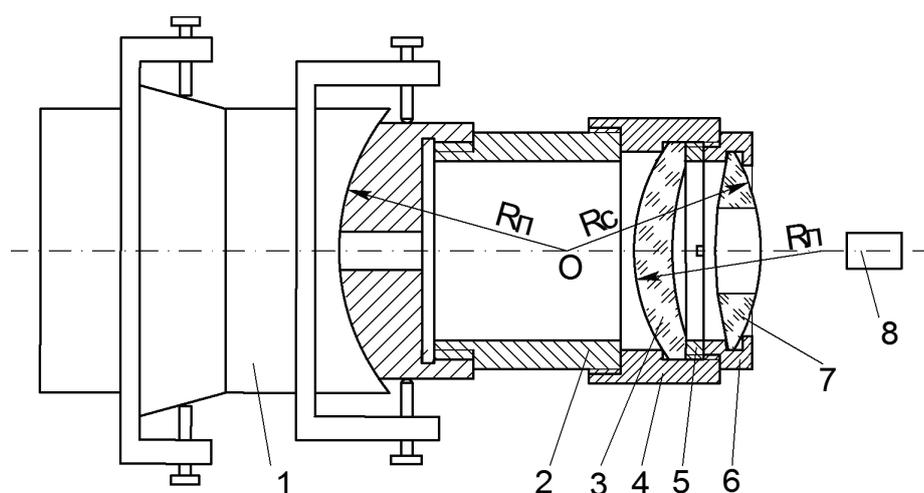


Рисунок 1.

Установка центрирования в оправе линз, работающих в ИК – области спектра

закреплённую в оправе 4, и автоколлимационный микроскоп 8, установленный на задней бабке токарного станка. Поверхность линзы-свидетеля 7, ближайшая к автоколлимационному микроскопу 8, имеет радиус R_C , равный радиусу невидимой поверхности R_L центрируемой линзы 3. Центр кривизны этой поверхности линзы-свидетеля 7 путём подбора длины переходной оправки 2 совмещён с центром кривизны O поворотной сферической части патрона 1, имеющей радиус R_{II} . Линза-свидетель 7 выполнена со сквозным центральным отверстием, из стекла марки К8 по ГОСТ 3514-94.

Способ центрирования линз, работающих в инфракрасной области спектра, осуществляют следующим образом.

В оправу 4 устанавливают центрируемую линзу 3, поджимают её зажимным резьбовым кольцом 5, затем закрепляют насадку 6 с линзой-свидетелем 7 так, чтобы линза-свидетель 7 была соосна линзе 3. Центрируют ближайшую к автоколлимационному микроскопу 8 поверхность линзы-свидетеля 7, т.е. получают автоколлимационное изображение центра кривизны этой поверхности и смещением сдвиговой части патрона 1 перпендикулярно оси вращения шпинделя станка выставляют центр кривизны этой поверхности на ось вращения шпин-

деля. Т. к. радиус центрированной ближайшей к автоколлимационному микроскопу 8 поверхности линзы-свидетеля 7 равен радиусу невидимой (в автоколлимационный микроскоп 8) поверхности центрируемой линзы 3, при этом происходит самоцентрирование невидимой поверхности линзы 3.

Затем перемещением поворотной сферической части патрона 1 центрируют видимую в автоколлимационный микроскоп 8 поверхность линзы 3 через отверстие в линзе-свидетеле 7. При этом автоколлимационное изображение центра кривизны поверхности линзы 3 получают без учёта хода луча через линзу - свидетель 7. Благодаря этому не сбивается автоколлимационное изображение от центрированной поверхности линзы-свидетеля 7. После этого извлекают насадку 6 с линзой-свидетелем 7 из оправы 4 и обрабатывают торцевые и цилиндрическую поверхности оправы 4.

Таким образом, предлагаемый способ центрирования линз позволяет повысить точность центрирования в оправках линз, работающих в инфракрасной области спектра, и снизить трудоёмкость способа.

Список литературы:

1. РТМ 3-216-72 «Объективы. Типовой технологический процесс центрирования линз в оправе методом автоколлимации».

ТЕХНОЛОГИИ ДВУСТОРОННЕЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

СИНЧУГОВ К.М.

E-mail: skm2304@gmail.com

Станки по обработке двух поверхностей. Исследование дополнительных механизмов. Направление работ по двухсторонней обработке. Обработка алмазным инструментом. Станки для тонкого шлифования

Ключевые слова: алмазное шлифование, двухдисковые доводочные станки, характеристики движения фомирования рабочих поверхностей.

В настоящее время двусторонняя обработка плоских поверхностей оптических деталей нашла широкое применение как в нашей, так и зарубежной промышленности. За счет переоснащения оптических цехов отрасли высокопроизводительным шлифовально-полировальным оборудованием, совершенствования технологических процессов обработки и внедрения в практику процессов чистового алмазного шлифования позволило значительно повысить эффективность оптического производства.

Трудоемкость обработки на операциях чистового алмазного шлифования и полирования сократилась в 2 - 3 раза за счет устранения вспомогательных ручных операций по блокированию, разблокированию, лакированию и промывки в ЛВЖ. Одновременно повысились точностные параметры изготавливаемых деталей, такие как клин, чистота и фокус.

Технологические возможности двусторонней обработки оптических деталей (ОД) определяются типоразмерами применяемого оборудования. Современные двухдисковые станки для двусторонней обработки отличаются друг от друга размерами инструмента (притиров), конструктивным исполнением возможности механизма доводки и их приводом, скоростью оборотов и направлением

вращения притиров, а так же количеством шпинделей.

Современные двухдисковые станки изготавливают с неподвижными притирами: с вращающимися верхним и нижним притирами; с изменением величины и скорости их вращения; с приводом вращения одного из притиров, например, нижнего и без привода вращения верхнего притира; с изменением величины и направления скорости их вращения. Двухдисковые доводочные станки с неподвижными притирами выпускаются следующих типов:

– с планетарным приводом сепаратора мод. (3В ... 12В) фирмы «Hamai» (Япония); PR-1, PR-2 «Gladitz GmbH» (США); станки английской фирмы «Carco-Dallons» и др.

– с эксцентриковым приводом сепаратора модели PR-3 - «Gladitz GmbH» (США); станки фирмы «Carco-Dallons» и др.

К двусторонним станкам с приводом вращения только нижнего притира относятся модели 16FS - «Norton» (США); Т - РМ - 400 «Tsugami» (Япония); ALO - «Peter Wolters» (Германия); серии MDF - фирмы «Somos» (Франция); серия станков фирмы «Speed Fam» (США) и др.

С приводом вращения нижнего и верхнего притиров выпускаются станки моделей AL-1, AL-2, AC-500, AC-1800 - фирмы «Peter

Wolters»; ZL-350, ZL-500, ZL-800 фирмы «Hahn & Kolb» (Германия) и др.

По конструктивному исполнению механизма доводки станки можно разделить на две основные группы: станки с планетарной наладкой (рис. 1) и станки с эксцентриковой наладкой (рис. 2). На рис. 1 дана схема привода станка с планетарной наладкой, где: 1 - верхний инструмент, 2 - нижний инструмент, 3 - центральное колесо, 4 - наружное колесо, 5 - заготовки обрабатываемых деталей, 6 - сепаратор. В общем случае планетарный механизм представляет собой механизм с двумя степенями свободы, центральное и наружное колеса которого могут получать независимое вращение. Строго определенная кинематическая зависимость между значениями $W_{Ц.К.}$ и $W_{Н.К.}$ по величине и знаку устанавливается после настройки станка, когда осуществляется замыкание цепи исполнительного механизма с кинематической цепью привода станка. На рис. 2 представлена схема механизма привода станка с эксцентриковой наладкой, где: 1 - верхний инструмент, 2 - нижний инструмент, 3 - эксцентрик, 4 - сепаратор, 5 - заготовки обрабатываемых деталей.

В станках с эксцентриковой наладкой, кроме предусмотренной возможности сооб-

щать вращение верхнему W_B и нижнему W_H инструменту, эксцентриковый вал, являющийся основным шпинделем станка данного типа, получает вращение от привода станка с угловой скоростью $W_Э$. Значение угловых скоростей W_B , W_H и $W_Э$ являются параметрами, независимыми друг от друга, т.е. исполнительный механизм имеет три степени свободы.

Исследования исполнительных механизмов станков позволило найти общие геометрические и кинематические зависимости, на основе которых посредством простых расчетов определяется математический вид для разных по своей структуре схем механизма. От вида цикловых траекторий зависит циклично повторяющаяся закономерность изменения линейных скоростей и ускорений относительного движения, которая влияет на характер износа инструмента.

Типовые траектории движения любой точки сепаратора или центральной точки детали, которые фиксируются на одном из вращающихся с угловой скоростью W инструментов (например, на рабочей поверхности нижнего инструмента) рассмотрим на примере планетарного механизма. Траектории относительного движения центра детали по инструменту при работе станка с планетарной наладкой

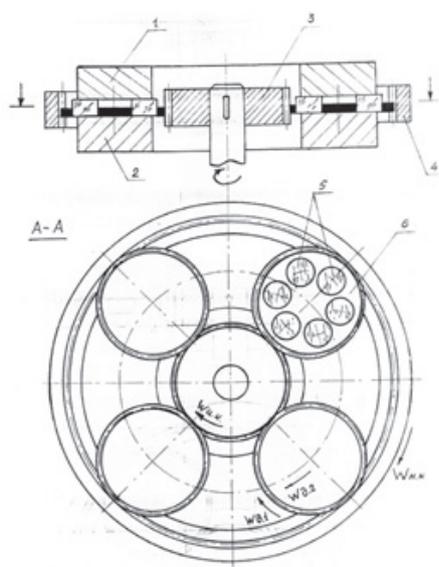


Рисунок 1.
Схема механизма привода станка с планетарной наладкой

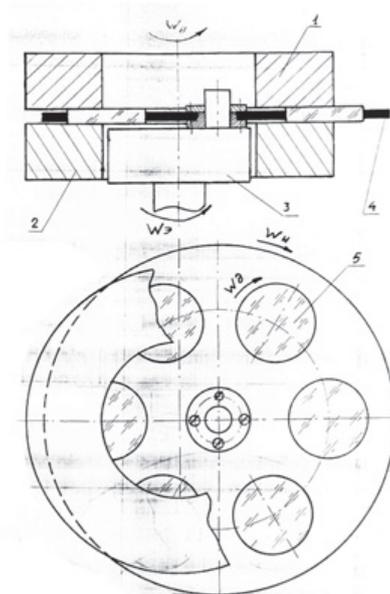


Рисунок 2.
Схема механизма привода станка с эксцентриковой наладкой

зависят от величины и знака передаточного отношения: $I=N_c/N_{\Pi}$ где: N_c - число оборотов сепаратора с деталями в абсолютном движении; N_{Π} - число оборотов одного из инструментов (например, нижнего) или условного водила в абсолютном движении, т.е. по отношению к неподвижной стойке. Если $N<0$, то траектории относительного движения являются гипоциклоидами, если $N>0$ эпициклоидами и если $0<I<1$ - перициклоидами.

Для станков эксцентрикового типа со свободным вращением сепаратора траектории относительного движения детали по притиру зависят от возникающих моментов сил трения и направления вращения эксцентриситета.

Подробный анализ вида траекторий в относительном движении деталь-инструмент и аналитический расчет координат точек цикловых траекторий изложен в литературе [1,3]. Ранее существующие сведения в области двусторонней обработки плоских оптических деталей (ОД) показали, что технологические процессы и оборудование базировались на использовании свободного абразива. С переходом к шлифованию на связанном абразиве необходимо было решать вопросы, связанные не только с конструкцией станков

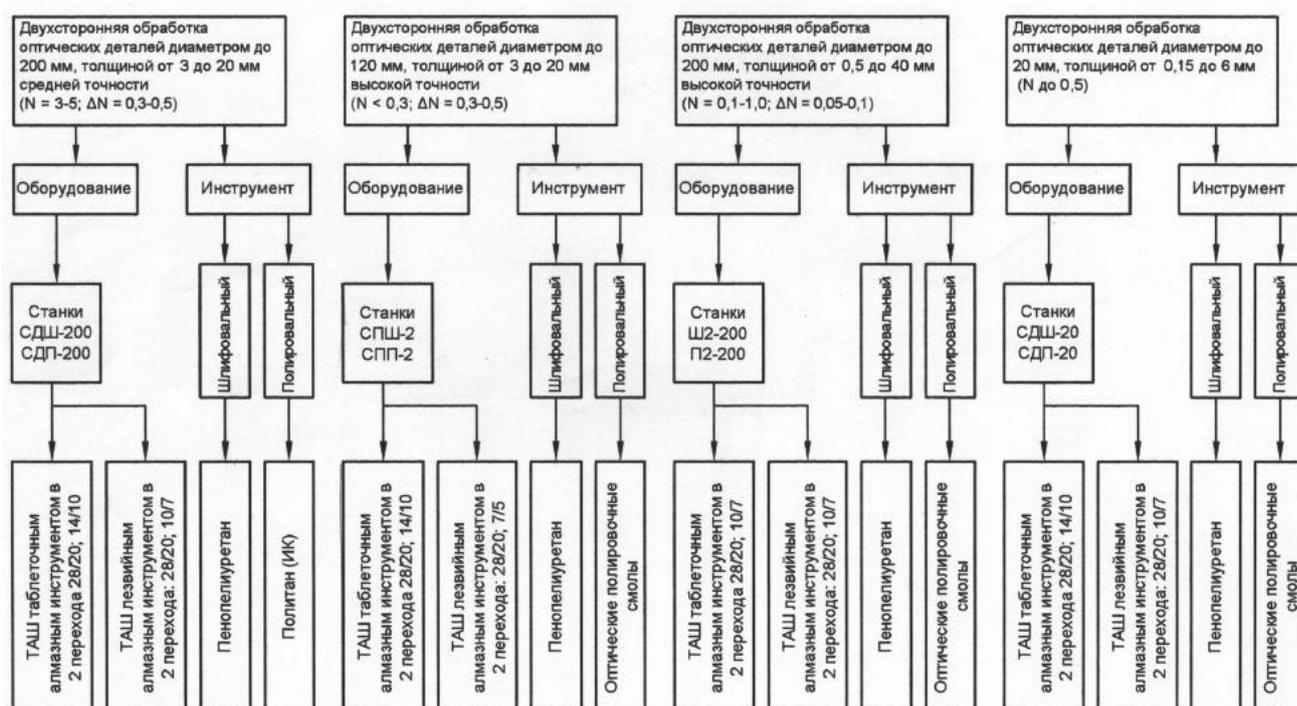
и схемой обработки, позволяющих получать ОД требуемой точности, но и с разработкой конструкций и технологий изготовления и доводки алмазного шлифовального и полировального инструментов.

В конце 90-х годов на предприятии Р-6670 (ныне ОАО «НПО «Оптика») проводились работы по разработке технологических процессов, оборудования, спецнастки и инструмента для двусторонней обработки плоских ОД для различных типоразмеров. Направления работ по созданию оборудования и технологий двусторонней обработки плоских ОД представлены в табл. 1.

На начальном этапе выполнения работ по исследованию технологических процессов обработки ОД средней точности были использованы станки электронной промышленности мод. СДШ-100 и СДП-100. Станки имели планетарную схему наладки и металлические притиры: чугунные для шлифования свободным абразивом и стальные с обтянутой подложкой для полирования. С целью использования данных станков для обработки ОД средней точности ($N=3-5$ и $\Delta N=0,3-0,5$) алмазным инструментом и синтетическими полировальниками на основе

Таблица 1.

Направление работ по двусторонней обработке плоских оптических деталей



пенополиуретана была проведена их модернизация. Алмазный инструмент представляет собой плоскую металлическую подложку на рабочей поверхности которого закреплены алмазные элементы. Алмазные элементы, как правило, имеют форму цилиндра (пятачка) с размерами 10 – 14 мм и высотой 5 мм или пластины 20x15x1,5 мм.

Технологический процесс изготовления инструмента состоит из следующих основных операций:

- подготовка рабочей поверхности корпуса инструмента для лучшей адгезии со склеивающим материалом;
- разметка рабочей поверхности инструмента для размещения алмазных элементов с учетом коэффициента заполнения, как общего, так и по зонам;
- установка алмазных элементов в соответствии с проведенной разметкой и закрепление их склеивающим материалом, например эпоксидной смолой.

Обработка алмазным инструментом проходит в два перехода с использованием элементов с фракцией алмазного порошка 28/20 и 14/10 или 10/7. Заготовки ОД должны иметь шероховатость обрабатываемых поверхностей не ниже по Ra и откалиброваны по толщине с разницей не более 0,1мм. Мелкие фракции алмазного порошка, используемые на операциях шлифования привело к понятию ТАШ (тонкое алмазное шлифование), часто используемое в технической литературе.

Выбор полирующих подложек для обработки ОД средней точности определялся из условий наибольшей производительности процесса полирования, возможности получения требуемых параметров по чистоте и точности обрабатываемых поверхностей, а так же стойкостью самого инструмента. Проведенные испытания показали, что в наибольшей степени этим условиям удовлетворяет полирующий материал из пенополиуретановой подложки, разработанный на предприятии п/я Р-6670 и даже выпускаемый отечественной промышленностью.

Пенополиуретан, сокращенно ПНУ выпускался в виде ленты шириной 120 мм и тол-

щиной от 0,5 до 3 мм. Выбор толщины подложки определялся требованиями к точности обрабатываемых поверхностей. При полировании ОД с $N \geq 5$, где основным требованием является чистота поверхности, толщина подложки значения не имеет и определяется сроком службы.

При полировании ОД с $N = 3-5$ используются подложки толщиной до 2 мм. Подробный отчет по работе, а так же о инструкции по изготовлению, доводке и корректировке рабочих поверхностей шлифовально-полировальных инструментов изложены в техническом отчете по теме ТТ10-527-85 [3].

В настоящее время станки с планетарной схемой наладки для обработки ОД на операциях ТАШ и полирования, разработанные и изготовленные НПО «Оптика», внедрены в производство. Единичные экземпляры станков успешно зарекомендовали себя на предприятии НПЗ г. Новосибирск и НПО «Технология» г. Обнинск. На рис. 3 показан внешний вид станков СДШ-200, СДП-200, где последние буквы аббревиатуры говорят о предназначении станков для операций шлифования и полирования.

Разработка технологии и оборудования для обработки плоских ОД высокой точности ($N = 0,1$; $\Delta N = 0,05 - 0,1$) начиналась с экспе-

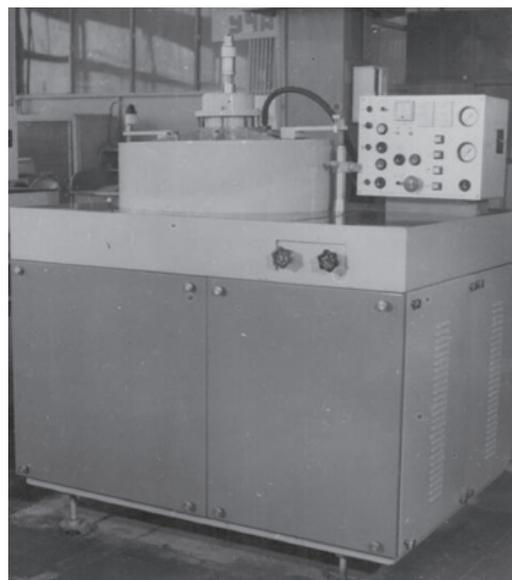


Рисунок 3.

Внешний вид станков СДШ-200, СДП-200

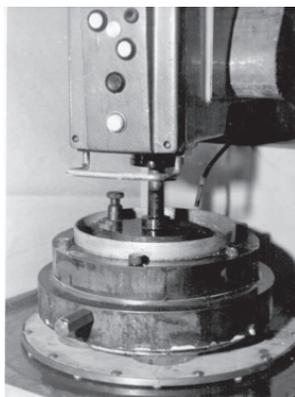


Рисунок 4.
Станок мод. ЗБ814

риментальных исследований на станке мод. ЗБ814 (рис. 4), затем на модернизированных станках ПД-500М (рис. 5), имеющих эксцентриковую схему наладки и позволяющих вести обработку безнаклеечным способом в сепараторах одновременно с двух сторон. На первом этапе проводились испытания различных типов алмазного инструмента с целью определения их работоспособности во времени без принудительного вскрытия алмазных элементов в случае снижения их режущей способности.

Испытания проводились на малоинтенсивных режимах, что является одним из условий при доводке высокоточных поверхностей. Частота вращения эксцентрикового вала не превышала 60 об/мин. Измененная электро-схема позволяла менять направление вращения эксцентрикового вала через регулируемый промежуток времени. Одновременно обрабатывались 8 деталей диаметром 120 мм и толщиной 25 – 30 мм из стекла марки К8. Шлифование проводилось в два перехода.

На первом переходе использовался инструмент с алмазными элементами пластинчатой формы зернистостью 28/20 1%-ой концентрации.

На втором переходе испытывались элементы с улучшенными характеристиками, зернистостью 7/5. Экспериментальным путем определялась минимальная шероховатость поверхности, при которой контроль точности формы поверхности осуществлялся с помощью пробного стекла. В этом случае процессом формообразования можно управлять

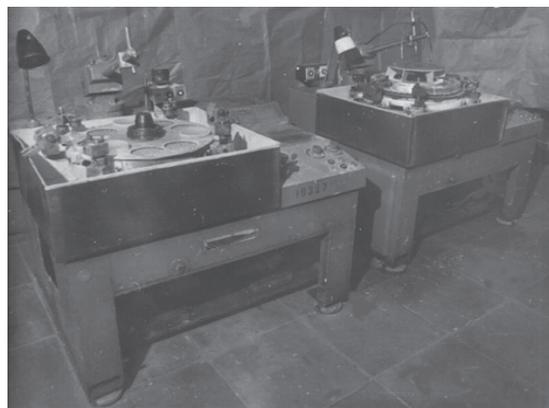


Рисунок 5.
Станок ПД-500М

на стадии шлифования. Функция финишной операции полирования и доводки по «цвету» сводилась к сохранению точности поверхности с получением требуемой чистоты. Испытания проводились с использованием различных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Режимы обработки ТАШ 2-го перехода были приближены к режимам обработки на операциях полирования. Величина оборотов эксцентрикового вала не превышала 20 об/мин. Инструмент с элементами пластинчатой формы имеет работоспособность и постоянство съема стекла во времени аналогично инструменту с пяточковыми элементами на основе высокопористой металло-органической связке со значительно более высокой фракцией алмазного порошка 20/14. Шероховатость поверхностей ОД, обработанных инструментом с элементами пластинчатой формы на металлической связке и высокопористой металлоорганической связке идентичны и составляют 0,06-0,08 по Ra, однако инструмент с элементами пластинчатой формы имеет более высокую износостойкость. Следует особо отметить, что при исследовании процессов формообразования поверхностей, обрабатываемых ОД на операции полирования были учтены знания и опыт, проведенных ранее работ. Так, например, была разработана и выбрана форма полировального инструмента, ячеистой структуры рабочей поверхности (рис. 7, 8), а так же отработана технология нанесения полировочной смолы на рабочую поверхность и способ ее формования до требуемой точности. Для предвари-

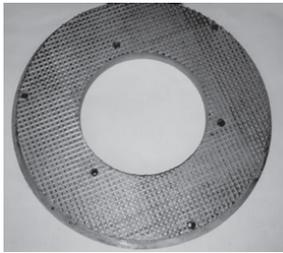


Рисунок 6.



Рисунок 7.

тельного формования рабочих поверхностей полировального инструмента было специально изготовлено ситалловое кольцо, отполированное с двух сторон с точностью $N \leq 0,5$ на диаметре 120 мм (см. фото 5). Кинематика модернизированного станка ПД-500М позволяла получать в процессе операции полирования сложные циклические траектории движения обрабатываемых деталей. При эксцентриковой наладке с периодическим реверсированием шпинделя станка, на котором закреплен сепаратор, сложные циклические движения деталей влияли на форму рабочих поверхностей полировального инструмента, которые, в свою очередь, обеспечивали получение требуемой плоскостности обрабатываемых деталей. Процесс формования рабочих поверхностей полировальников осуществлялся в автоматическом режиме реверсирования вращения шпинделя станка, на котором расположена ось эксцентрика. Через 5-10 минут после начала рабочего цикла обработки в рабочую зону поверхностей подавали полиритную суспензию. Зерна полирита, внедряясь в смоляную подложку полировального инструмента, ориентировались по направлению сил трения, действующих

между полируемыми поверхностями деталей и инструментов. На рис. 8-11 схематически показаны реализуемые в данном процессе траектории движения деталей. Точка O_d - центр одной из обрабатываемых деталей 1, перемещаемых по поверхности соосных полировальников 2 сепаратором 3. Сепаратор 3 - может свободно вращаться вокруг своей оси O_c , которой задают принудительное вращение вокруг оси O соосных полировальников. Пусть оси O_c сепаратора задают, например, вращение вокруг оси O полировальников 2 по часовой стрелке. Центры O_d деталей 1 описывают в начале процесса полирования овалоподобные траектории T_o по поверхности полировальников так же по часовой стрелке (рис. 8). Зерна полирита в процессе полирования внедряются в поверхность смоляной подложки полировальников. Режущие кромки полировальных зерен, внедренных в полировальники, ориентируются по направлению движения центра деталей. Если рассматривать отдельные зоны полировального инструмента, то ориентация зерен полирита на внешних зонах направлена по часовой стрелке, а на внутренних - против часовой стрелки. Такая ориентация вызывает проти-

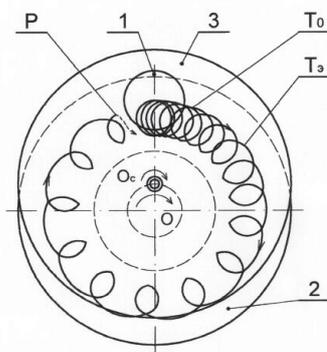


Рисунок 8.

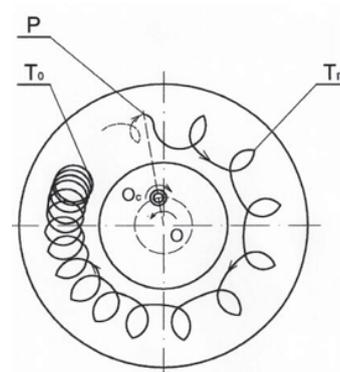


Рисунок 9.

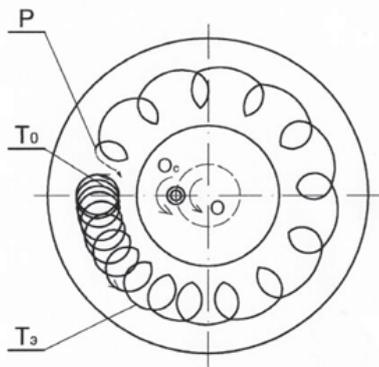


Рисунок 10.

воположные моменты сил. Один момент сил вращает детали вокруг собственной оси, другой передается деталями сепаратору, вращая его вокруг оси O_c . Возникновение второго момента происходит потому, что при смещении сепаратора за счет эксцентриситета, одна часть деталей располагается во внешних зонах полировального инструмента, другая - во внутренних. Возрастающий второй момент сил приводит к ускоренному вращению деталей и сепаратора вокруг оси O_c и переходу овалоподобной траектории движения центра деталей в удлиняющуюся эпициклоиду. Максимальный шаг эпициклоиды ограничивают в пределах до 1,5 диаметра детали, так как движение деталей с большим шагом, формирует поверхность полировальников на "яму". Ограничение шага удлиняющейся эпициклоиды ТЭ. регулируют временем реверса вращения оси сепаратора O_c вокруг оси полировальников. Например, когда центр детали 1 находится в точке Р траектории T_3 , оси сепаратора сообщают вращение против часовой стрелки (рис. 8-9). Однако переориентация зерен полировального порошка, внедренных в смоляную подложку полировального инструмента, не происходит в момент реверса. Силы трения их ориентаций продолжают вращать сепаратор с деталями по часовой стрелке вокруг оси O_c . Траектория движения центров деталей изменяется в точке Р с удлиняющейся эпициклоиды (рис. 8) на гипоциклоиду T_r (рис. 9).

В результате движения деталей по гипоциклоиде происходит переориентация режущих кромок полировального порошка. Переориентация сопровождается уменьшением шага

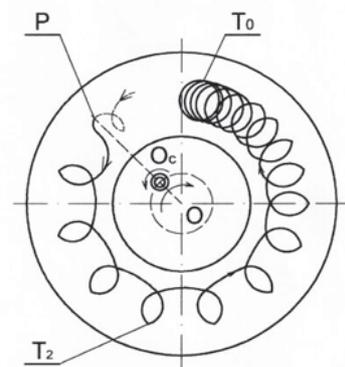


Рисунок 11.

гипоциклоиды. В момент, когда действия режущих усилий на внешней и внутренних зонах полировальников уравниваются, как в начале процесса, укорачивающаяся гипоциклоида переходит в овалоподобную траекторию T_0 (рис. 9-10). Вращение сепаратора с деталями вокруг оси O_c приостанавливается. Таким образом, движение центров деталей отличается от их движения в начале процесса, только направлением. Дальнейшее принудительное вращение против часовой стрелки оси сепаратора O_c (рис. 10) вокруг оси O вызывает противоположную ориентацию режущих кромок зерен полировального порошка.

Это приводит к возникновению момента сил, вращающего сепаратор с деталями против часовой стрелки. Центры деталей начинают описывать траектории удлиняющейся эпициклоиды T_0 (рис. 10).

При достижении шага эпициклоиды величины 0,5 - 1,5 диаметра детали, происходит реверсирование вращения оси сепаратора O_c вокруг оси O , например в точки Р (рис. 10-11). Траектория движения центров деталей с удлиняющейся эпициклоиды переходит в точке Р в укорачивающуюся гипоциклоиду T_r (рис. 11), переходящую затем в овалоподобную траекторию T_0 с вращением по часовой стрелке. На этом завершается один цикл процесса. Дальнейшая обработка деталей производится по аналогичной схеме. В результате проведенных работ по ТАШ и полированию на модернизированных станках ПД-500М на деталях $\varnothing 120$ мм были достигнуты точностные характеристики по плоскостности $N = 0,05$ с одной стороны и $N = 0,07$ с другой стороны.

На основании полученных результатов по двусторонней обработке высокоточных ОД были разработаны и изготовлены образцы станков мод. СПШ-2 и СПП-2. Последующие работы по двусторонней обработке ОД были направлены на создание станков для обработки деталей диаметром до 20 мм и толщиной от 0,15 мм до 6 мм. Были разработаны и изготовлены станки мод. СДШ-20 и СДП-20. Станки предназначены соответственно для тонкого алмазного шлифования и полирования плоскопараллельных деталей из стекла, кварца, керамики и других твердых неметаллических материалов в условиях мелкосерийного производства. Основной целью испытаний являлось определение возможности получения требуемых точностных параметров ОД толщиной 1,0 - 1,5 мм на операциях ТАШ и полирования плоских поверхностей безнаклеечным способом, а также обработки деталей толщиной до 0,15 мм. Испытания станков проводились при обработке 3-х наименований ОД: стекло марки К8 диаметром 6,5 мм толщиной 1,2+0,125 мм, кварцевый резонатор из кварца КУ-1 диаметром 14,4 мм толщиной 1,0+0,1 мм и кварцевый резонатор диаметром 6 мм толщиной 1,0+0,1 мм. Данные результаты испытаний подтвердили возможности станков при обработке ОД с требованиями по точности: $N = 0,5-2$, $\Delta N = 0,1-0,3$, клиновидность $Q = 1$ угл. сек. Необходимо отметить, что для достижения данных результатов испытаний были разработаны и изготовлены специальные натяжные сепараторы из полимерной пленки. Так же были опробованы возможности получения деталей с меньшей толщиной. При этом обработка велась с применением наклейки деталей на эталонную плоскопараллельную пластину. Сначала обрабатывались с двух сторон первые стороны деталей, затем, после переклейки - вторые. Это позволило получить детали из кварца диаметром 6 мм и толщиной 0,07-0,1 мм.

При наличии финансирования есть возможность продолжения работы с целью улучшения технических характеристик отечествен-

ного оборудования за счет последних достижений в области шлифовально-полировального инструмента с применением новых СОЖ и полирующих суспензий.

Список литературы:

1. Глухов Ю.А., Гузман В.Е. Технология и инструмент для тонкого шлифования. Аналитический обзор за 1975-1985 гг. ЦНИИ Информации, М., 1985 г.
2. Синчугов К.М. Алмазный инструмент для обработки стекла, кристаллов и керамики. ЦНИИ Информации, М., 1979 г.
3. Тимофеева А.М., Никонова Н.А., Альтишуллер В.М., Коровкин В.П. Внедрение тонкого алмазного шлифования оптических деталей на модернизированном оборудовании. Сборник тезисов докладов. ЦНИИ Информации, М., 1979 г.
4. Мастюгин Л.И., Кремер Т.А., Гулицкий Д.Г. Тонкое алмазное шлифование плоских оптических деталей из стекла С95-2 алмазным инструментом на органической связке. Сборник тезисов докладов. ЦНИИ Информации, М., 198 г.
5. Филатов Ю.Д., Rogov В.В., Рублев Н.Д. Результаты опытно-промышленной проверки процесса полирования деталей точной оптики инструментом со связанным абразивом. Сборник тезисов докладов. ЦНИИ Информации, М., 1988 г.
6. Орлов П.Н., Савелова А.А., Полухин В.А. и др. Доводка прецизионных деталей машин. Машиностроение, М., 1988 г.
7. Грибов Б.Г., Мазин А.М., Родионов Р.А. и др. Обзор по электронной технике. М., 1988 г.
8. Алейник И.И., Гукетлев Ю.Х., Емельянов В.А. и др. Электронная промышленность. М., 1988 г.
9. Гербер Я.М. Двухдисковые доводочные станки конструкции СКБ шлифовального оборудования. Северо-западный политехнический институт.
10. Технический отчет. УДК 65.015.13.535. Разработка техпроцесса двусторонней обработки оптических деталей. «Зигзаг», 1978 г.
11. Садохин В.П., Скоморовский В.И. и др. Прецизионная двусторонняя обработка. ЦНИИ Информации, М., 1988 г.
12. Орлов П.Н. Алмазно-абразивная доводка деталей. НИИМАШ, М., 1972 г.

НАНЕСЕНИЕ ОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ ДИАМЕТРОМ ДО 4 м МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

АЗЕРБАЕВ А.А., МУХАММЕДЗЯНОВ Т.Р., АБДУЛКАДЫРОВ М.А., БАЛАНДИН В.Ю.

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

E-mail: ktb-2@lzos.ru

В ОАО ЛЗОС была создана вакуумная установка для нанесения отражающих покрытий на крупногабаритные оптические детали диаметром до 4.0 м методом магнетронного распыления. Отработан технологический процесс нанесения отражающего алюминиевого покрытия с защитным слоем из SiO_2 . Проведены ускоренные климатические испытания покрытия $\text{Al}+\text{SiO}_2$, по результатам которых определен эксплуатационный ресурс покрытия, составивший 30 лет. Достигнута равномерность толщины покрытия $\pm 5\%$ на максимальном диаметре 4.0 м.

Ключевые слова: вакуумная установка, отражающее покрытие с защитным слоем, магнетронное распыление, крупногабаритная оптическая деталь.

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что отражающее покрытие для зеркал телескопов требуется регулярно наносить заново вследствие их загрязнения, повреждения в процессе эксплуатации. Для этого, как правило, рядом с обсерваториями создают комплексы по нанесению отражающих покрытий на зеркала телескопов. Однако есть случаи, когда невозможно осуществить нанесение покрытия на оптическую деталь рядом с местом его эксплуатации. Например, для оптических деталей космического базирования или когда создание комплекса по нанесению покрытий экономически нецелесообразно или просто невозможно. В таких случаях заказчику удобно наносить покрытия в том же месте, где и изготавливается оптическая деталь. Это позволяет сократить расходы и риски при транспортировке от места изготовления зеркала к месту нанесения покрытия. С этой целью в ОАО ЛЗОС была создана вакуумная установка для нанесения отражающих покрытий на крупногабаритные оптические детали диаметром до 4.0 м методом магнетронного распыления.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ

На момент создания вакуумной камеры требовалось нанесение отражающего покрытия из алюминия Al с защитным слоем. В качестве материала защитного слоя был выбран SiO_2 (кварц). Было рассмотрено несколько вариантов отражающего Al покрытия с различными толщинами защитного слоя SiO_2 (рис. 1).

Покрытие с Al без защитного слоя приведено, как эталон по оптическим характеристикам для данного типа покрытия. Покрытие с защитным слоем SiO_2 толщиной 17 нм обладает коэффициентом отражения, близким к параметрам эталонного отражающего Al покрытия без защитного слоя. Однако такое покрытие не имеет механической прочности и защищает слой Al только от деградации его отражающей способности при воздействии окружающей среды (окисление, воздействие влажности и т.д.). Толщина слоя SiO_2 , равная 50 нм, не обеспечивает достаточной механической прочности для проведения многократных операций по очистке поверхности зеркала с покрытием. Покрытие с защитным

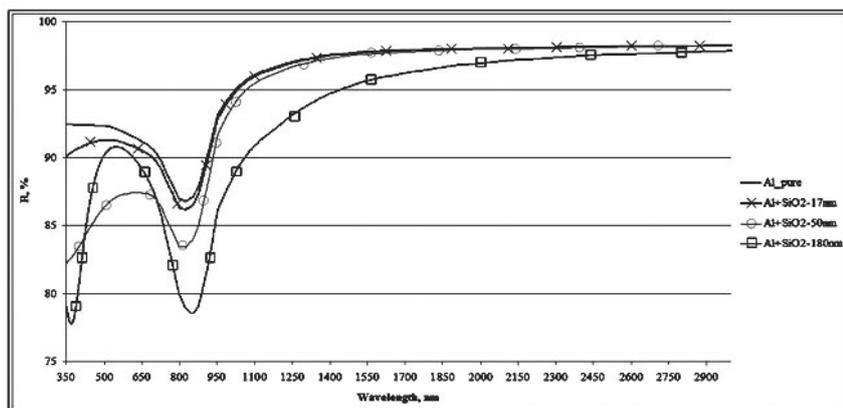


Рисунок 1.

Спектральный коэффициент отражения алюминиевого покрытия без защитного слоя и с защитным слоем SiO_2 толщинами 17, 50 и 180 нм

слоем SiO_2 толщиной 180 нм сильно снижает коэффициент отражения в некоторых областях спектра, но механическая прочность такого покрытия достаточна для многократной протирки поверхности детали с покрытием безворсовой салфеткой.

Поскольку величина механической прочности играет большую роль для покрытий, наносимых в рамках концепции «изготовление+покрытие в одном месте», для проведения ускоренных испытаний по определению ресурса работы было выбрано покрытие с защитным слоем SiO_2 толщиной 180 нм. Испытания проводились циклично и включали в себя:

- проверку на воздействие повышенной температуры $+70^\circ\text{C}$;
- проверку на воздействие пониженной температуры -60°C ;
- проверку на воздействие повышенной влажности 95% при температуре $+40^\circ\text{C}$.

Каждый цикл соответствует примерно 1 году ресурса работы в условиях умеренно-холодного климата и хранения в неотапливаемом помещении. После каждого цикла проверялись параметры покрытия: коэффициент отражения, адгезия, механическая прочность, внешний вид. Длительность испытания составила 10 циклов. Покрытие Al с защитным слоем SiO_2 толщиной 180 нм выдержало 10 циклов испытания без изменения своих параметров. Т.е. можно говорить, что ресурс такого покрытия составляет более 10 лет эксплуатации в указанных выше климатических условиях. Таким образом, за базовое

покрытие, обрабатываемое на созданной вакуумной установке, было принято покрытие с отражающим слоем Al толщиной 120 нм и с защитным слоем SiO_2 толщиной 180 нм.

ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА. СОСТАВ И ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

Созданная вакуумная установка (рис. 2) состоит из следующих основных частей:

- вакуумной камеры с узлом вращения детали;
- системы откачки;
- системы напыления и ионной очистки;
- системы управления.

2.1. Вакуумная камера с узлом вращения детали

Вакуумная камера объемом 23 м^3 представляет собой разъемную торосферическую обечайку и состоит из стационарной части и съемной крышки. В стационарной части ка-



Рисунок 2.

Вакуумная установка для нанесения отражающих покрытий на крупногабаритные оптические детали методом магнетронного распыления

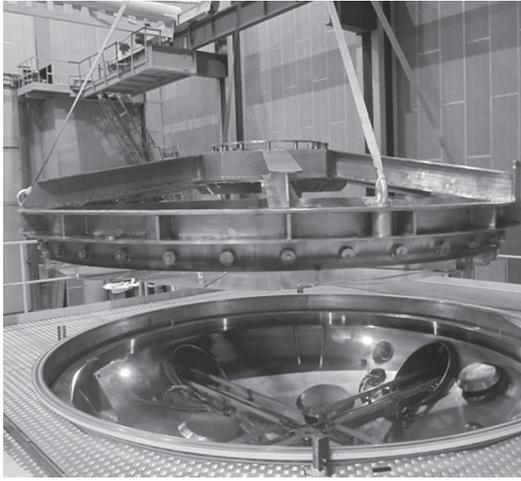


Рисунок 3.

Загрузка оправы с деталью в вакуумную камеру

меры расположены 4 патрубка (гаража) для парковки магнетронов во время техобслуживания и для наблюдения за магнетронами при выводе их на рабочий режим. Также в стационарной части находится опорный подшипник диаметром 4700 мм, на который ложится оправа с деталью, расположенной рабочей поверхностью вниз (рис. 3).

Подшипник совместно с приводом вращения, установленным на съемной крышке камеры, обеспечивает вращение оптической детали во время нанесения покрытия. Привод передает крутящий момент через специальное зацепление на оправе, в которой крепится оптическая деталь. Сам привод установлен вне камеры, а передача вращающего момента внутрь камеры происходит через герметизированный вал. Герметизация вала происходит при помощи магнитоэластичного уплотнения, в котором роль механического уплотнения играет магнитная жидкость, удерживаемая постоянным магнитом. Использование цельного подшипника в роли опорного кольца позволяет добиться максимально плавного вращения оправы с деталью, а также снять с привода вращения осевую нагрузку. Также в стационарной части камеры находятся различные вводы, обеспечивающие подвод рабочего газа, холодной воды и электропитания к устройствам, расположенным внутри камеры, и патрубки, необходимые для монтажа к камере насосов и вакуумпроводов. Съемная крышка при от-

крытии камеры поднимается вверх 4 приводами на высоту ~500мм, затем по направляющим рельсам отъезжает в сторону, открывая свободный доступ внутрь камеры. На внешней поверхности камеры крепится змеевик для подвода холодной и горячей воды, необходимой для охлаждения или нагрева камеры. В вакуумной камере есть 6 смотровых окон - 4 окна по бокам в стационарной части и 2 в верхней части съемной крышки для наблюдений за процессом нанесения покрытия. Все внутренние элементы вакуумной камеры, находящиеся в вакууме, изготовлены из нержавеющей стали.

2.2. Система откачки.

При помощи запорной и коммуникационной арматуры к стационарной части камеры прикреплены три криогенных насоса Coolvac10000 производительностью 10000 л/с, турбомолекулярный насос HiPace2300 и форвакуумный агрегат, состоящий из насоса Рутса WH7000 и винтового насоса DV650S. Для контроля давления в области форвакуума используются датчики Pirani, пьезорезистивные датчики и баратрон, а в области высокого вакуума - ионизационные Bayard-Alpert датчики.

Все используемые при откачке насосы – безмасляные. Это гарантирует отсутствие углеводородов в остаточной среде, что положительно сказывается на качестве покрытия.

Благодаря синхронизации работы насосов откачка вакуумной камеры до давления $1 \cdot 10^{-5}$ mbar происходит всего за 30 минут, а до давления $3 \cdot 10^{-6}$ mbar, при котором можно начинать процесс нанесения покрытия – меньше, чем за 2 часа.

2.3. Система напыления и ионной очистки

Как правило, в вакуумных установках подобного типа для нанесения покрытия используются протяженные магнетроны длиной 1,0 м и больше [1,2]. Наша установка отличается тем, что в ней используются циркулярные магнетроны диаметром всего 160 мм.

Система напыления и ионной очистки состоит из трех циркулярных магнетронов с диаметром распыляемой мишени 160 мм,

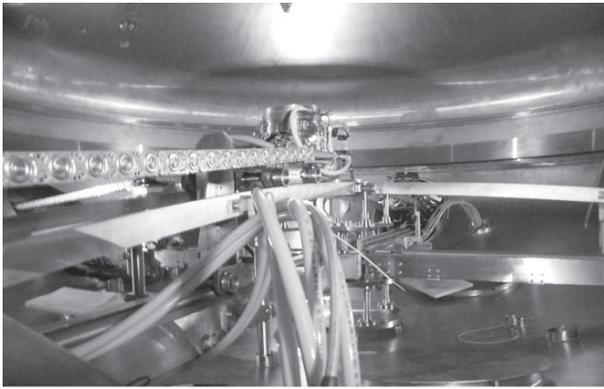


Рисунок 4.
Каретка с магнетроном
при движении по направляющей рейке

ионного источника и системы их перемещения.

Система перемещения магнетронов представляет собой направляющую рейку, по которой на роликах передвигается каретка с магнетроном (рис. 4).

Движение магнетрона осуществляется посредством преобразования крутящего момента от шарико-винтовой пары в поступательное движение каретки с магнетроном. Конфигурация направляющей рейки повторяет профиль поверхности оптической детали. Таким образом, при использовании всего 1 привода на 1 магнетрон удастся добиться эквидистантного и нормального (по углу) расположения магнетрона от поверхности детали. Точность перемещения при этом составляет $\pm 0,5$ мм. Такое перемещение магнетрона является важной составляющей для достижения равномерности толщины покрытия не хуже $\pm 5\%$. Поступательное движение магнетрона и вращение детали в сумме дают, что магнетрон относительно детали движется по спирали. Такая система нанесения покрытия при помощи циркулярного магнетрона технически более сложная, чем системы, основанные на протяженных магнетронах. Однако она имеет и несколько преимуществ:

- управляя скоростью движения магнетрона и его скоростью напыления, можно достичь указанной равномерности покрытия без использования специальной выравнивающей маски;

- добиться стабильной работы циркулярно-

го магнетрона легче, чем протяженного магнетрона;

- мишень для циркулярного магнетрона проще и дешевле в изготовлении, а также для диаметра 160 мм мишени монолитные, а не наборные, как например, кремниевая мишень для протяженного магнетрона.

Для нанесения базового покрытия $Al+SiO_2$ система напыления оснащена двумя магнетронами для нанесения слоя Al и одним магнетроном для нанесения слоя SiO_2 . Конструктивно все три магнетрона одинаковы и отличаются только мишенями. Это позволяет использовать три различных материала для нанесения других типов покрытия, например, 4-слойное отражающее покрытие $NiCrN_x-Ag-NiCrN_x-Si_3N_4$. Для нанесения слоя Al используется мишень диаметром 160 мм из высокочистого Al (99.999%), а для нанесения SiO_2 – мишень диаметром 160 мм из сплава $Si:Al$ (90%:10%). Получение слоя SiO_2 достигается путем распыления кремниевой мишени в среде аргона и кислорода. В качестве рабочего газа при распылении Al используется аргон. Три циркулярных магнетрона питаются от двух источников Pinnacle Plus+Pulsed-DC мощностью 10kW фирмы Advanced Energy. Выход одного источника питания Pinnacle Plus+Pulsed-DC коммутируется на два магнетрона.

Контроль скорости нанесения покрытия происходит с помощью кварцевых датчиков и штатно осуществляется только при выводе магнетронов на рабочий режим перед процессом нанесения покрытия. Этого, как показывает практика, достаточно для проверки нормальной работы магнетрона. Однако в систему управления заложена возможность проверки скорости роста толщина покрытия и во время его нанесения. Для этого магнетрон перемещается в гараж, где находится кварцевый датчик, затем проверяется скорость нанесения покрытия, при необходимости производится коррекция параметров магнетрона, магнетрон возвращается на то место, где был прерван процесс напыления, и нанесения покрытия продолжается.

Для подготовки и активации поверхности

детали внутри вакуумной камеры и непосредственно перед нанесением покрытия применяется DC Ion Source с источником питания Solus DC Ion Source Controller мощностью 6 kW. Ионный источник перемещается радиально до центра зеркала и назад с заданной скоростью. Скорость перемещения источника и скорость вращения детали подобрана таким образом, чтобы обеспечить равномерную обработку поверхности детали. Система перемещения ионного источника идентична системе перемещения магнетронов.

2.4. Система управления

Система управления установкой выполнена на основе программируемого логического контроллера (PLC). Взаимодействие человека с PLC осуществляется при помощи управляющей программы на персональном компьютере, соединенном с PLC. Управляющая программа имеет несколько уровней допуска для обслуживающего персонала – от полного доступа для разработчика до уровня оператора, в котором возможен только запуск автоматического режима работы установки. В системе управления реализовано три режима работы установки – ручной, полуавтоматический и автоматический. Это обеспечивает достаточную гибкость в работе с установкой: ручной и полуавтоматические режимы позволяют внедрять новые технологические процессы нанесения покрытий, а автоматический режим удобен при нанесении уже отработанных покрытий.

Система управления оснащена программными и аппаратными блокировками, максимально предотвращающими получение травм обслуживающим персоналом, а также повреждение оборудования установки или оптической детали вследствие возникновения аварийной ситуации. Кроме того, в системе управления заложена возможность возобновления процесса нанесения покрытия с места прерывания. Система управления ведет постоянный мониторинг состояния частей установки и проходящего технологического процесса. Эта информация записывается и хранится в банке данных.

Таким образом, можно отследить хроно-

логию и причинно-следственные связи того или иного события, произошедшего в работе установки.

3. НАНЕСЕНИЕ БАЗОВОГО ПОКРЫТИЯ

Al+SiO₂

После монтажа вакуумной установки в ОАО ЛЗОС и проведения пуско-наладочных работ последовал этап отработки нанесения базового покрытия. Требовалось получить покрытие Al+SiO₂ со следующими характеристиками: Среднее для диапазона длин волн 250-1200 нм должен быть $\geq 85\%$ и равномерность покрытия на диаметре 4.0 м (за исключением центральной зоны диаметром 200 мм) - не хуже $\pm 5\%$. Также покрытие должно иметь хорошую адгезию и механическую прочность.

Отработка проводилась на образцах диаметром 30 мм, изготовленных из астроситалла. Образцы в специальной оснастке равномерно распределялись через каждые 100 мм по 4 радиусным направлениям, расположенным под 90° друг к другу (рис. 5).

Для измерения коэффициента отражения использовался спектрофотометр Lambda 950 с Universal Reflectance Accessory (URA). Равномерность отражающего слоя Al исследовалась по толщине при помощи оптического профилометра NanoCam (рис. 6), а равномерность защитного слоя SiO₂ - по спектральному коэффициенту отражения.



Рисунок 5.

Специальная оснастка с держателями образцов и экраном для избегания запыления внутрикамерных элементов



Рисунок 6.
Измерение толщины слоя Al
при помощи оптического профилометра
NanoCam

Механическая прочность проверялась методом истирания на приборе проверки механической прочности, разработанном в ОАО ЛЗОС. Принцип метода заключается в измерении сопротивляемости покрытия истиранию резиновым наконечником, находящимся под нагрузкой. Истирание происходит при вращательном движении образца с покрытием. Количественно сопротивляемость истиранию выражается в числе оборотов, при которых не происходит разрушение покрытия. Для отражающего покрытия из Al с защитным слоем SiO_2 толщиной 180 нм механическая прочность должна составлять минимум 2000 оборотов. Адгезия покрытия проверялась при помощи наклеивания полосок липкой ленты типа скотч на поверхность образца и последующего их (полосок) отрыва. Адгезия покрытия считается хорошей, когда не происходит отслоения ни слоев покрытия между собой, ни всего покрытия от поверхности образца.

Обработка нанесения базового покрытия проходила в два этапа – сначала достигались требуемые параметры для покрытия с Al без защитного слоя SiO_2 , а затем для покрытия Al+ SiO_2 . Для достижения требуемой равномерности покрытия были опробованы различные комбинации изменения скорости нанесения покрытия, скорости движения магнетронов, скорости вращения оправы и количества проходов магнетронов. Этап от-

работки нанесения базового покрытия длился около двух месяцев. За этот срок было выполнено порядка 30 циклов нанесения покрытия.

В итоге процесс нанесения покрытия выглядит следующим образом: после откачки камеры и проведения ионной обработки производится включение двух магнетронов с мишенями из Al и вывод их на рабочий режим. Под рабочим режимом магнетрона подразумевается стабильное получение заданных параметров без электрических пробоев. Вместе с магнетронами включается вращение оправы. Источник питания магнетронов работает в режиме стабилизации мощности, т.е. мощность магнетрона поддерживается на одном уровне путем изменения напряжения и тока. Затем происходит проверка скорости нанесения покрытия при помощи кварцевых датчиков. И вывод магнетронов на рабочий режим, и проверка скорости нанесения осуществляется в гараже. После проверки скорости нанесения магнетроны выезжают из гаражей – начинается нанесение слоя Al на образцы (рис. 7).

Причем один магнетрон идет с небольшим запаздыванием относительно другого. Это сделано, чтобы избежать столкновения магнетронов в центре. Дойдя до центра, каждый из двух магнетронов выключается и с максимальной скоростью движется обратно в гараж. Затем включается только один маг-



Рисунок 7.
Нанесение слоя Al на образцы методом
магнетронного распыления

нетрон и цикл действий повторяется. Таким образом, нанесения слоя Al толщиной 120 нм осуществляется за три прохода при помощи двух магнетронов. После нанесения слоя Al включается магнетрон с мишенью из кремния. Происходит вывод его на рабочий режим, измерение скорости нанесения, после чего магнетрон выезжает из гаража, и начинается процесс нанесения слоя SiO₂. Слой кварца получается путем окисления частиц кремния, распыленного из мишени, в среде подаваемой смеси из аргона и кислорода. Для этого источник питания магнетрона работает в импульсном режиме при стабилизации напряжения. При работе источника питания в импульсном режиме кремний на поверхности мишени окисляется в промежутках между импульсами подачи напряжения, а при подаче напряжения получившийся оксид кремния распыляется. Слой SiO₂ толщиной 180 нм осуществляется за три прохода при помощи одного магнетрона. В таблице 1 изложены итоговые параметры технологического процесса базового покрытия.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам этапа отработки нанесения базового покрытия были получены следующие результаты:

- разброс толщины слоя Al в радиальном направлении составил от 115.9 нм до 125.9 нм (рис. 8) при требовании 120 нм ± 6 нм (±5%), а разброс толщин между радиусными

направлениями составил от 120.4 нм до 123.8 нм по усредненным значениям (рис. 9).

- R_{среднее} составил от 85% до 85.7% согласно спектральным распределениям коэффициента отражения, представленным на рис. 10;

- неравномерность слоя SiO₂ составила меньше ±5%.

Это видно из рисунков 11 и 12, на которых отображены участки спектральных кривых покрытий на разных образцах. Рис. 11 показывает разброс спектральных кривых вследствие неравномерности слоя SiO₂ в области спектра около длины волны 700 нм, а рисунок 12 показывает то же, но для области около 400 нм. К сожалению, данный метод дает лишь приблизительную оценку неравномерности. Так для области около 700 нм неравномерность составляет примерно ±1%, а для области около 400 нм – примерно ±2%.

Адгезия и механическая прочность покрытия соответствуют поставленным требованиям на всех образцах в течение всей отработки нанесения базового покрытия. Более того, покрытие на части образцов было испытано на истирание при 3000 оборотов. И покрытие на всех исследуемых образцах выдержало данное испытание. По стандарту оптического приборостроения, принятому в России, это соответствует высшей группе механической прочности.

Были проведены ускоренные испытания для определения максимального срока службы покрытия. По итогам испытаний ба-

Таблица 1.
Итоговые параметры технологического процесса базового покрытия

Параметры технологического процесса нанесения базового покрытия	Значение параметра	
	для нанесения слоя Al	для нанесения слоя SiO ₂
Скорость вращения оправы	возрастающая линейно от 0.2 до 3 оборотов/мин.	постоянная, 2 оборота/мин.
Скорость движения магнетрона	возрастающая по определенному закону	возрастающая по определенному закону
Скорость нанесения покрытия	постоянная	постоянная
Параметры источника питания магнетрона	стабилизация мощности	стабилизация напряжения
Количество проходов магнетрона	3 прохода двумя магнетронами	3 прохода одним магнетроном

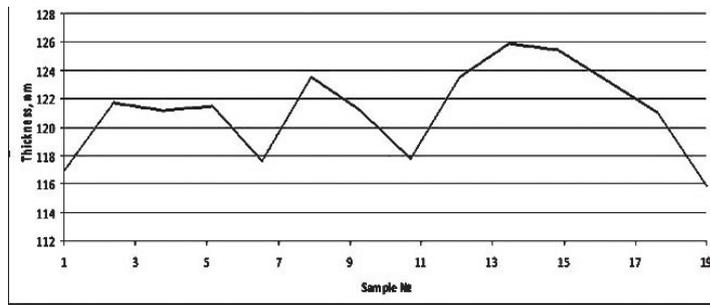


Рисунок 8.

Распределение толщины слоя Al в радиальном направлении

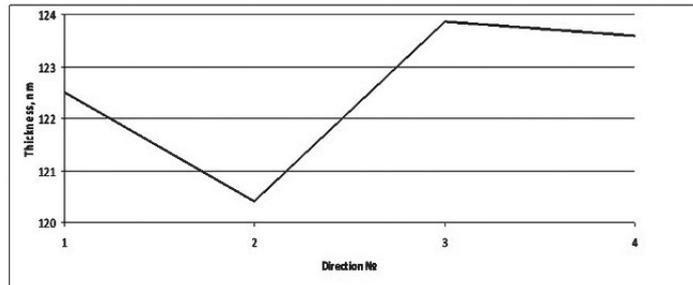


Рисунок 9.

Распределение толщины слоя Al по радиусным направлениям

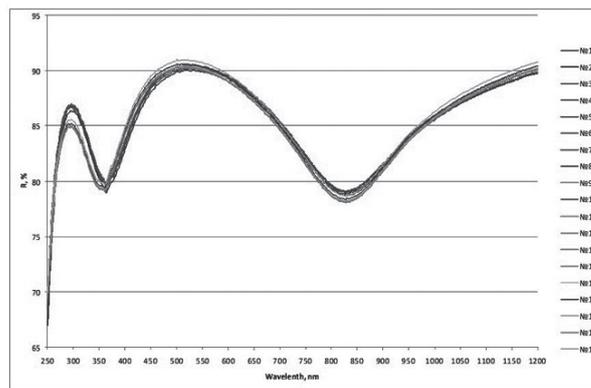


Рисунок 10.

Спектральный коэффициент отражения базового покрытия Al+SiO₂

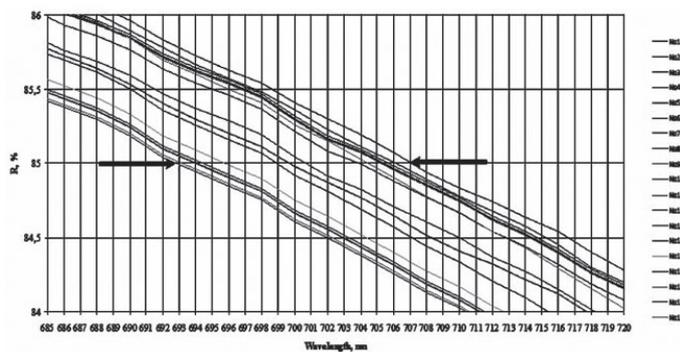


Рисунок 11.

Разброс спектральных кривых покрытия из-за неравномерности слоя SiO₂ в области спектра около 700 нм

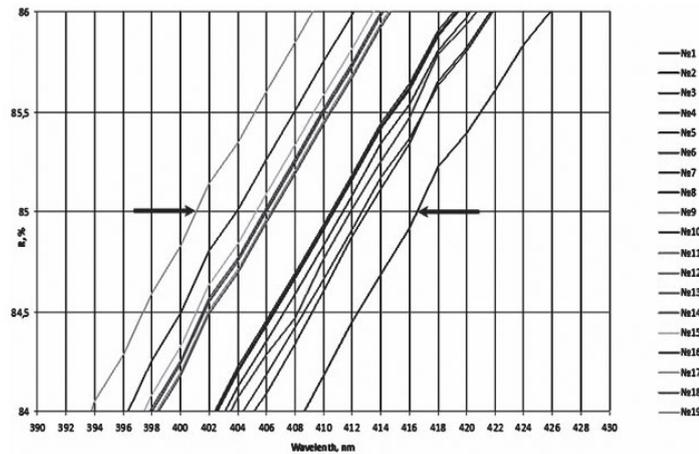


Рисунок 12.
Разброс спектральных кривых покрытия
из-за неравномерности слоя SiO_2 , в области спектра около 400 нм

зовое покрытие выдержало 30 циклов без изменения своих характеристик. Т.е. ресурс работы базового покрытия с отражающим слоем Al толщиной 120 нм и с защитным слоем SiO_2 толщиной 180 нм составляет 30 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ОАО ЛЗОС была создана вакуумная установка для нанесения отражающих покрытий на крупногабаритные оптические детали диаметром до 4.0 м методом магнетронного распыления. Отработано базовое отражающее Al покрытие с защитным слоем из SiO_2 , для которого получены высокие результаты по равномерности - $\pm 5\%$ на диаметре 4 м, по механической прочности, адгезии и хорошие по оптическим параметрам. Проведены ускоренные испытания базового покрытия, по результатам которых было определено, что срок эксплуатации такого покрытия составляет 30 лет.

Произведено нанесение базового покрытия на две детали диаметром 1150 мм: плоское зеркало и сферическое зеркало с радиусом сферы 34000 мм, и на асферическое зеркало диаметром 1120 мм. На всех трех зеркалах параметры покрытия соответствовали значе-

ниям, достигнутым при отработке нанесения базового покрытия. В ближайшем будущем планируется проведение работ по улучшению равномерности базового покрытия, а также нанесение на ряд деталей различного диаметра – от 1900 мм до 2100 мм. Прорабатывается вопрос нанесения покрытия на детали диаметром 3190 мм и 4000 мм.

С вводом в эксплуатацию вакуумной установки для нанесения отражающих покрытий на крупногабаритные оптические детали методом магнетронного распыления ОАО ЛЗОС обладает полным – от варки стекла до нанесения покрытия - производственным циклом изготовления крупногабаритных оптических деталей диаметром до 4.0 м.

Список литературы:

1. M. Voccas ; T. Vucina ; C. Araya ; E. Vera ; C. Ahhee. Coating the 8-m Gemini telescopes with protected silver. Proc. SPIE 5494, Optical Fabrication, Metrology, and Material Advancements for Telescopes, 239 (September 24, 2004).
2. Alistair M McPherson, A. Born, W. Sutherland, J. Emerson, B. Little, P. Jeffers, M. Stewart, J. Murray, K. Ward. VISTA: Project Status. Proc. of SPIE Vol. 6267, 626707-12 (2006).

ГОСУДАРСТВЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ ЭКОНОМИКО-ОРГАНИЗАЦИОННОГО МЕХАНИЗМА ПРОИЗВОДСТВА НАУКОЕМКОЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

ПЕЛИХ С.А., ПЕЛИХ И.С.

Академия управления при Президенте Республики Беларусь
Московский технический университет

E-mail: dashkevich_alesya@mail.ru

Рассматриваются проблемы государственного регулирования инновационного развития и пути их решения в условиях переходной экономики Беларуси и России.

Ключевые слова: монетарная политика, курс валюты, конвертируемость валюты, государственное регулирование, CALS-технологии, вертикальные интегрированные структуры, наукоемкая продукция, инновационная политика.

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 валюты осуществлялось по ППС, свободная продажа валюты была введена только в се-

редине 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 прогнозируемую 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 – опре-

делять 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 наукоёмкую промышленную политику, имея до 10 млрд. долл. США государственных инвестиций, растрачиваемых сейчас на некритичный импорт. Следует перестроить деятельность банковской системы страны по рационарованию 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 быстрейшее их решение позволит Республике Беларусь, а также Российской Феде-

рации и дальше устойчиво и поступательно развивать свою экономику.

Теперь хотелось бы обратить внимание на роль государства в экономике в наше время. И здесь хотелось бы сослаться на русского ученого В.В. Леонтьева.

Василий Васильевич Леонтьев занимает выдающееся место в мировой экономической науке XX столетия. Его многогранная деятельность отмечена почти всеми возможными для ученого прижизненными знаками мирового признания. Это связано, прежде всего, с громадной практической значимостью его научных исследований.

Для иллюстрации достаточно привести один пример. В своей работе «Экономика «затраты-выпуск» 1986 г. В.В. Леонтьев пишет: «Без движущей силы частного предпринимательства, действующей в гибкой системе свободной рыночной экономики, США никогда не достигли бы сегодняшнего высокого уровня благосостояния. Невидимая рука механизмов конкуренции в ценообразовании не в состоянии, однако, поддерживать сбалансированность системы и обеспечить удовлетворение быстро растущих общественных потребностей без направленного действия и поддержки другой, отчетливо видимой руки – государственного регулирования [1, с. 225]. Справедливость этого усматривается в том, что США и другие развитые страны под сильным государственным управлением смогли построить эффективный механизм производства наукоёмкой продукции, а Советский Союз и страны СНГ не сумели, чем заметно ослабили и ослабевают свою экономику.

По числу зарегистрированных патентов, полученных национальными заявителями, Беларусь (35 на 1 млн. населения) заняла позицию посередине Европейских стран, опережая Испанию (20 на 1 млн. населения), Португалию, Грецию и уступая Швеции (55 на 1 млн. населения). В то же самое время Беларусь и Россия за период 1990 – 2014 годы снизила наукоёмкость ВВП (ва-

лового внутреннего продукта) с 2,11 до 0,7 – 0,99 %. Испания имеет высокие среднегодовые темпы роста наукоемкости ВВП за эти годы – 6,32%. Это показывает на недостатки нашей инновационной системы по трансформации новых знаний в инновации. Т.е. наша инновационная восприимчивость составляет около 10 % от генерированных нацией новых идей.

Опыт развитых стран показывает, что институциональная среда инновационной деятельности имеет решающее значение как источник инноваций и условие эффективной организации внедрения достижений научно-технического процесса в выпуск машиностроительной продукции. Развитые страны построили такой механизм участников инновационного механизма, в котором взаимоотношения государства, местных властей, научных организаций, университетов, бизнеса, финансовых посредников становятся не менее, а более важными, чем процесс производства новых знаний.

В результате создания такого организационно-экономического механизма страны Запада в настоящее время производят более 80% наукоемкой машиностроительной продукции с высокой добавленной стоимостью. Такая продукция успешно пробивает себе дорогу на рынке благодаря тому, что обладает низкой «стоимостью владения изделием», что обеспечивается соответствующими организационно-техническими мероприятиями и принципами создания сложной техники, важнейшими из которых являются:

1. Применение CALS-технологий при создании продукции;
2. Высочайшие показатели качества и ремонтпригодности.

Общеизвестно, что для потребителя интерес представляет длительная работа без поломок купленной техники и возможность ее быстрого ремонта и восстановления. На предприятиях это характеризуется такими показателями, как «наработка на отказ» и

время, в течение которого предприятие гарантирует произвести ремонт вышедшей из строя техники. «Нарработка на отказ» означает время, в течение которого предприятие у себя проводит безостановочную обкатку выпускаемой продукции. Так, например, японские, корейские фирмы всю бытовую технику прогоняют 10000 – 15000 часов непрерывно на стендах и, если стиральная машина или холодильник не выдерживают такой срок в лаборатории, сборочный конвейер останавливается и будет пущен в работу после нахождения и ликвидации причины поломки. Второй показатель означает такую организацию сервисной службы предприятия, которая бы обеспечила ремонт выпускаемой техники в течение 24 или 48 часов в любой точке мира. Например, «Катерпиллер» обеспечивает ремонт своей строительной техники в течение 48 часов в любой стране мира, «Мерседес» ремонтируется в странах Европы в течение 24 часов, а в Германии в течение 3 часов.

Что же требуется нашему обществу сделать, чтобы внедрить CALS-технологии, которые и дают в конечном итоге конкурентоспособность на мировом рынке.

Прежде всего, нам надо подавить инфляцию до 1 – 2 % годовых и довести количество денег в стране до суммы равной 100% ВВП.

По мере того, как денежно-кредитная политика сможет формировать нормальную конкурентную среду, будут создаваться организационные условия для проведения структурной политики в промышленности, сохраняющей и поддерживающей наш интеллектуальный потенциал.

Прежде всего, применяя реинжиниринг бизнес процессов, нужно реструктурировать наши предприятия так, чтобы они превратились в холдинги. Во главе холдинга станет сборочный завод (цех) с конструкторским бюро и штабными подразделениями («ядро») и несколькими десятками са-

мостоятельных фирм-поставщиков деталей и узлов для сборочного завода, которые в формирующейся сетевой структуре управления называются «агентами». Сформировавшаяся сетевая структура промышленности будет иметь ряд существенных преимуществ перед пирамидальной функциональной структурой управления:

1. Фирма при сетевой структуре разбивается на несколько десятков юридических лиц, они оптимальны по численности, т.е. хорошо управляемы.

2. Руководство «ядра» все внимание может уделить только тому, как в кратчайшие сроки создать и выпустить на рынок сложнейшее изделие. У него достаточно времени и ресурсов для того, чтобы организовать стратегический маркетинг своих изделий. Руководство фирмы имеет возможность построить открытую для всех технических инноваций гибкую производственную систему.

3. Руководство «агентских фирм» точно таким образом способно удерживать на высочайшем уровне в поле зрения производство своих узлов и деталей, создав для этого гибкие производственные системы, которые экономически выгоднее наших тем, что они полностью используют «эффект масштаба», т.к. работают на другие «ядра» по всему миру.

4. Фирма «ядро», саккумулировав все достижения НТП в конечном сложном наукоемком изделии, полностью диктует условия создания добавленной стоимости по всей производственной цепочке. Она оставляет за собой все научно-исследовательские, проектные, сборочные, наладочные процессы. Осуществляет продажу конечного изделия, оставляя «агентам» поставку деталей и узлов по назначенной ей цене. Так фирма «Боинг» продает самолет, имея в цене 2500% добавленной стоимости, а покупает у тысячи «агентов» детали и узлы на самолет с добавленной стоимостью 10-15%. Поэтому развитые страны стали «сборочным цехом» наукоемкой про-

дукции, выталкивая на «периферию» мирового сообщества все остальные операции. Государственная структурная политика в данном случае имеет четкие ориентиры в своей деятельности, создавать «ядра» и поддерживать их всей своей мощью, что актуально для Беларуси и России.

Надо создавать сетевую структуру управления нашей промышленностью, которая будет состоять из нескольких сотен «ядер» и сотен тысяч мелких саморегулируемых, самокупаемых бизнес-единиц «агентов». Это позволит под контролем государства приватизировать все «агентские» фирмы. Государство же будет владеть инфраструктурой и несколькими десятками особо важных промышленных объектов, контролировать деятельность «ядер» и поддерживать их конкурентное состояние, что определит развитие нашей экономики. Государственное регулирование общественного производства несравненно упростится, сведется только к стратегическому, концептуальному. Оно будет только задавать правила игры, а не осуществлять опеку множества государственных предприятий.

Для того, чтобы мы могли встроиться в мировое сообщество, нам параллельно надо срочно вместе со структурными преобразованиями перевести предприятия в систему международных стандартов ИСО-9000. При этом перевод технической документации надо осуществлять с бумажных носителей информации на электронные носители. Это ускорит вхождение реструктурированного предприятия в единое информационное пространство страны и мирового сообщества. Таким образом, при принятии соответствующей государственной программы и мощной организационной и финансовой поддержке, мы сможем за 3-5 лет создать сетевую структуру управления промышленностью и быть открытыми для участия в мировом разделении труда на основе CALS-технологий.

CALS-технологии (CALS – Continuous Acquisition and Life Cycle Support) родились в США в 80-х годах. Предвестником этих технологий были идеи «безбумажной информатики» на основе электронного обмена данными, выдвинутые в начале 70-х годов академиком В.М. Глушковым. Они нашли воплощение в русле глобальной стратегии CALS, которая развивалась в США по линии Министерства обороны и оборонных отраслей промышленности. Целью была эффективная организация и интеграция обмена и управления данными при проектировании, производстве и логистической поддержке систем вооружения. В дальнейшем CALS-технологии стали успешно применяться в гражданских отраслях, позволив повысить эффективность использования компьютерных ресурсов предприятия на стадиях жизненного цикла разрабатываемой продукции.

В настоящее время CALS-технологиями охвачены предприятия более 80 стран, создана штаб-квартира – международный CALS-конгресс в г. Орландо. США вложило в CALS-технологии несколько миллиардов долларов. Эти вложения дают большую отдачу, окупив затраты. Созданное в CALS-технологии изделие заведомо дешевле любого другого и имеет более высокие качественные характеристики. Система самостоятельно сделает детализацию изделия, произведет расчеты, которые укажут, где и что экономичнее всего производить, выполнит размещение производства в пределах стран CALS-сообщества и осуществит контроль за изготовлением деталей и узлов, сборкой, испытанием, отладкой и доставкой потребителю изделия. К расчетному сроку она обеспечивает профилактический ремонт изделия, а когда срок «жизни» закончится, сообщит о месте и способе утилизации.

Необходимо осознавать, что, решая важную проблему повышения качества и конкурентоспособности продукции на основе

CALS-технологий, зарубежные фирмы преследовали и задачу ограничения доступа на рынок продукции тех предприятий, которые не сумеют овладеть этими новейшими технологиями. И дело не только в том, что наши предприятия не смогут говорить на одном информационном языке с зарубежными фирмами. Главное состоит в том, что применение CALS-технологий позволяет значительно снизить себестоимость производимой продукции при одновременном значительном повышении ее качества и удобства эксплуатации.

Это означает, что задержка с внедрением CALS-технологий в промышленности может привести, во-первых, к потере внешнего рынка наукоемкой продукции. Во-вторых, наши предприятия не смогут участвовать в рынке промышленной кооперации, т.е. поставке зарубежным фирмам комплектующих изделий. В-третьих, национальные корпорации, обеспечивающие десятки предприятий, не смогут обеспечить эффективное взаимодействие проектировщиков, поставщиков материалов и комплектующих изделий, изготовителей и потребителей наукоемкой продукции. А это приведет к экспансии на внутренний рынок зарубежных фирм, использующих преимущества CALS-технологий. Поэтому перед нашими институтами и предприятиями стоит сложнейшая задача освоения в ближайшие 5-7 лет процессов разработки и применения CALS-технологий для решения конкретных задач автоматизированного управления процессами проектирования, производства и эксплуатации наукоемкой продукции.

В сложившейся ситуации нужны кардинальные и оперативные меры по ликвидации возникшего отставания отечественной промышленности в области разработки и реализации CALS-технологий, соответствующих требованиям международных стандартов. Дальнейшее промедление по внедрению CALS-технологий приведет к

невосполнимому отставанию белорусской промышленности в этой области, в решающей степени определяющей не только уровень развития национальных технологических баз, но и экономическую и оборонную безопасность страны. С другой стороны, задержка с разработкой и реализацией CALS-технологий в различных отраслях промышленности станет в ближайшие несколько лет преградой для выхода предприятий на внешний рынок и послужит причиной дальнейшей экспансии импортной наукоемкой продукции на внутренний рынок стран СНГ.

Учитывая исключительную актуальность работ по применению CALS-технологий, представляется необходимым уже в ближайшее время в рамках государственной программы по реструктуризации промышленности:

1. Разработать и апробировать программно-методические средства, предназначенные для хранения и управления данными о продукции в соответствии с CALS-технологиями;

2. Разработать технологии и программные средства подготовки электронной эксплуатационной документации на изделие;

3. Разработать и передать в промышленность соответствующие стандарты по применению CALS-технологий. В первую очередь необходимо выпустить стандарты по переводу технической документации, используемой потребителем, в электронную форму. Исключительную актуальность этой работы подтверждают запросы зарубежных потребителей наукоемкой продукции;

4. Объединить усилия заинтересованных министерств и ведомств в финансировании первоочередных исследований в области CALS-технологий;

5. Необходимо создать Государственный

межведомственный центр по обучению и аттестации специалистов в области CALS-технологий. Подготовить соответствующие программы обучения, учебные пособия и компьютерные технологии обучения и аттестации специалистов;

6. Важнейшей задачей развития CALS-технологий является обеспечение предприятий информацией об отечественных и зарубежных разработках в области CALS-технологий. Для решения этой проблемы необходимо:

– в сети Интернет создать много профильный узел, на котором бы имелась постоянно обновляемая информация по отечественным и зарубежным стандартам и разработкам CALS-технологий. Для многих предприятий и организаций этот узел – источник информации в сфере CALS-технологий;

– проводить постоянно действующие выставки отечественных разработок в области CALS-технологий. Выставки крайне необходимы предприятиям, которые будут заниматься разработкой и применением CALS-технологий для решения конкретных производственных задач;

– необходимо организовать издание методических рекомендаций и учебников по применению CALS-технологий.

7. Разработать методику формализованного описания и анализа процессов, протекающих в ходе жизненного цикла изделия и создание на основе данного формализованного описания системы обеспечения качества продукции в соответствии с требованиями стандартов ИСО серии 9000.

Список литературы:

1. Леонтьев, В.В. Межотраслевая экономика. – Москва: Экономика, 1997.

2. Производственный менеджмент. Под ред. проф. Пелиха С.А. Мн.: БГЭУ, 2003.