

Голография. Наука и практика

XIV международная конференция  
HOLOEXPO 2017

Тезисы докладов



Holography. Science and Practice

XIV International Conference  
HOLOEXPO 2017

Proceedings

УДК 681.7+004.315.7+535.317.1  
ББК 22.343.4  
Г60

Г60 **Голография. Наука и практика** : XIV международная конференция HOLOEXPO 2017 : Тезисы докладов / МГТУ им. Н. Э. Баумана, ООО «МНГС». — Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — 268 с.

ISBN 978-5-7038-4771-8

Представлены тезисы докладов XIV международной конференции HOLOEXPO 2017 «Голография. Наука и практика» (12–14 сентября 2017 г., Звенигород, Россия), по следующим темам: технологии защитных голограмм, формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики и голографических систем, голограммные и дифракционные оптические элементы: методы компьютерного синтеза, метаматериалы, плазмонные структуры и технология изготовления, объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии, голографическая интерферометрия, голографическая память и оптико-голографическая обработка информации.

## Организаторы конференции

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Москва, Россия), АО «НПО «Криптен» (Дубна, Россия), ЗАО «Голографическая Индустрия» (Минск, Беларусь), ООО «ХолоГрэйт» (Санкт-Петербург, Россия), ФГУП «НТЦ «Атлас» (Москва, Россия), ООО «Дотрикс» (Москва, Россия), АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики» (Казань, Россия), Общественная научно-техническая академия «Контенант» (Красногорск, Россия), ООО «Микро и наноголографические системы» (Москва, Россия).

## Устроитель конференции



ООО «Микро и наноголографические системы»  
Москва, Россия

## Генеральный спонсор



АО «НПО «Криптен»  
Дубна, Россия

## Спонсоры конференции



ЗАО «Голографическая индустрия»  
Минск, Беларусь



ООО «Хологрэйт»  
Санкт-Петербург, Россия



ФГУП «НТЦ «Атлас»  
Москва, Россия



ООО «Микро и наноголографические системы»  
Москва, Россия



ООО «Дотрикс»  
Москва, Россия



АО «НПО «ГИПО»,  
Казань, Россия



Академия «Контенант»  
Красногорск, Россия

## Информационные спонсоры



Журнал «Водяной Знак»  
Санкт-Петербург, Россия



Журнал «Мир техники кино»  
Москва, Россия



Журнал «Фотоника»  
Москва, Россия



Журнал «Контенант»  
Красногорск, Россия

## Конференция проводится при поддержке

**Министерство образования и науки РФ** в лице департамента науки и технологий

**Ведущие университеты и научно-исследовательские институты России:** Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ им. М. В. Ломоносова), Российский университет дружбы народов (РУДН, Москва), Са-

марский государственный аэрокосмический университета имени С. П. Королева (СГАУ им. С. П. Королева), Институт систем обработки изображения РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (Самара), Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ (КНИТУ—КАИ), Общественная научно-техническая академия «Контенант» (Красногорск) и др.

**Ведущие научно-производственные предприятия России:** АО «НПО «Криптен» (Дубна), АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики» (Казань), АО «Красногорский завод имени С. А. Зверева» (Красногорск), ФГУП «НТЦ «Атлас» (Москва), ООО «ХолоГрэйт» (Санкт-Петербург), ООО «Микро и наноголографические системы» (Москва), ООО «Дотрикс» (Москва), АО «Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова» (ГОИ им. С. И. Вавилова, Санкт-Петербург), ОА «Швабе» (Санкт-Петербург), АО «Славич» (Переславль-Залесский) и др.

**Ведущие университеты и предприятия Республики Беларусь (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.

**Зарубежные компании и фирмы в области голографии:** OpSec Security (Великобритания), Концерн «Де-макс» (Болгария), ADL Optica GmbH (Германия), Process Color, Ignetta Ernakulam (Индия), «Geola digital UAB» (Литва), Институт голографии (Греция) и др.

**Международная ассоциация производителей голограмм (ИМА)** в лице директора по выставкам Микаэла Сидорова (Лондон, Англия)

### Список секций конференции

На конференции обсуждались научно-технические вопросы по следующим секциям:

1. Пленарное заседание ..... Современные тенденции развития голографии и голографических технологий
2. Секция № 1 ..... Технологии защитных голограмм
3. Секция № 2 ..... Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики
4. Секция № 3 ..... Голограммные и дифракционные оптические элементы: методы компьютерного синтеза, метаматериалы, плазмонные структуры и технологии изготовления
5. Секция № 4 ..... Объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии
6. Секция № 5 ..... Голографическая интерферометрия, голографическая память и оптико-голографическая обработка информации

HOLOEXPO 2017

[www.holoexpo.ru](http://www.holoexpo.ru)

## Содержание

### 1. Современные тенденции развития голографии и голографических технологий

- 1.1. Голографический метод записи голограмм во встречных пучках и его применение в Республике Беларусь (к 90-летию со дня рождения Ю. Н. Денисюка). *Л. В. Танин, В. А. Танин* ..... 11
- 1.2. Голография без голографии. Мифы и реальность. *Ю. Н. Овечкис* ..... 17
- 1.3. Последние достижения в области изготовления объемных многоцветных защитных голограмм на тонкопленочных фотополимерных носителях. *А. В. Смирнов, Б. В. Акимов, С. Б. Одинокоев, Д. С. Лушников* ..... 19
- 1.4. Техника и принципы Фурье-спектроскопии в гиперспектральной голографии. *С. Г. Каленков, Г. С. Каленков, А. Е. Штанько* ..... 23
- 1.5. Аппаратура ВНИИОФИ для интерференционных измерений. *Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев* ..... 26
- 1.6. Поляризационная динамическая голография. *А. Л. Толстик* ..... 33
- 1.7. Роль лазерно-голографических технологий в становлении и развитии основных наукоёмких научно-технических направлений в ГИПО (к 60-летию юбилею ГИПО). *В. П. Иванов, А. В. Лукин, А. И. Любимов, А. Н. Мельников, С. О. Мирумянц, А. Р. Насыров, Ф. А. Саттаров, А. Ф. Скочилов*. 36
- 1.8. Лазерные технологии для формирования структуры дифракционных оптических элементов. *А. Г. Полещук, В. П. Вейко, В. П. Корольков*..... 39
- 1.9. Голографические оптические элементы в устройствах виртуальной реальности. *А. Н. Путилин, А. В. Морозов, В. В. Дружин* ..... 46
- 1.10. Aerial views of religious monuments of Saint Petersburg. *A. Lembessis* ..... 49
- 1.11. Матричные фотоприемники в цифровых голографии и голографической интерферометрии. *Г. И. Грейсх, Е. Г. Ежов, С. В. Казин, С. А. Степанов* ..... 50
- 1.12. Голограммные элементы для систем космической оптики. *С. Н. Корешев* ..... 53
- 1.13. Изображающие системы на основе гармонических линз с кольцевой апертурой. *Р. В. Скиданов, А. А. Морозов, С. В. Ганчевская*..... 60
- 1.14. Особенности технологии прямой лазерной записи дифракционных и голограммных структур на пленках a-Si и GeTe. *А. А. Кутанов, Н. Сыдык уулу, И. А. Снимщиков, В. П. Макаров, С. С. Великасов*..... 62

### 2. Технологии защитных голограмм

- 2.1. Применение цифровых технологий при формировании первичного фазового рельефа в двухэтапной оптической записи защитных голограмм. *Ч. Б. Кайтуков, В. А. Киселев, А. В. Яновский* ..... 67
- 2.2. Устройство контроля качества голограмм, основанное на методе сравнительного анализа оптических характеристик с использованием машинного зрения. *А. М. Сергиенко, Д. А. Кожевников* ..... 70
- 2.3. Экспериментальные исследования по контролю качества защитных голограмм на основе метода косвенных измерений периода и глубины поверхностного микрорельефа. *В. В. Колючкин, И. К. Цыганов, С. Б. Одинокоев, Н. В. Пирютин, В. Е. Талалаев, Е. Ю. Злоказов* ..... 71
- 2.4. Особенности формирования асимметричных рельефов при записи голограмм нулевого порядка. *А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин*..... 74
- 2.5. New diffractive effects for security holograms produced with Geolas Originators. *S. Zacharovas, R. Bakanas, A. Bulanovs*..... 76
- 2.6. Новые подходы для защиты информации с помощью комбинированных поляризационных элементов с верификационной составляющей. *А. И. Горчарук, П. В. Моисеенко, Л. В. Танин, А. Г. Бобореко, М. Н. Лущиков, В. В. Еверкин* ..... 82

2.7. Оптико-электронный сканер для оперативного контроля подлинности защитных голограмм на документах. <i>И. К. Цыганов, В. В. Колючкин, В. Е. Талалаев, Н. В. Пирютин, С. Б. Одинокоев, Е. Ю. Злоказов</i> .....	84
2.8. Непосредственная запись голограмм на металле. <i>А. В. Шурыгин, А. Ф. Смык</i> .....	88
2.9. Разработка метода формирования многоцветных изображений, восстановленных с защитных голограмм. <i>Л. А. Найденов, И. К. Цыганов, Е. А. Дроздова, С. Б. Одинокоев</i> .....	90
2.10. Оптический энкодер на основе четырёхсекционной дифракционной решётки. <i>А. Ю. Жердев, М. В. Шишова, Д. С. Лушников, С. Б. Одинокоев, В. В. Маркин</i> .....	92
2.11. Использование плазмонных дифракционных структур с магнитооптическими слоями в устройствах считывания скрытой магнитной информации на документах. <i>С. Б. Одинокоев, А. С. Кузнецов, С. А. Барышев</i> .....	95

### 3. Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики

3.1. Однослойные дифракционные элементы для фото- и видеокамер мобильных устройств. <i>Г. И. Грейсх, Е. Г. Ежов, С. В. Казин, С. А. Степанов</i> .....	101
3.2. Дифракционные решетки на композите из бихромового желатина и органического полимера. <i>Н. М. Ганжерли, И. А. Маурер, С. Н. Гуляев, С. Ю. Быховский, Д. Р. Хазвалиева</i> .....	105
3.3. Голографические сенсоры компонентов водных растворов и биологических жидкостей. <i>А. В. Крайский, В. А. Постников, Т. В. Миронова, Т. Т. Султанов, А. А. Крайский, М. А. Шевченко</i> .....	109
3.4. Запись синтезированных волноводных голограмм для большеразмерных интегральных осветителей. <i>С. С. Копёнкин, Ю. П. Бородин, А. В. Морозов, С. Е. Дубынин, А. Н. Путилин</i> .....	116
3.5. Влияние дискретности синтезированных голограмм-проекторов на глубину резкости формируемых с их помощью изображений. <i>С. Н. Корешев, М. А. Фролова</i> .....	119
3.6. ЛИППС на объемных образцах и тонких пленках металлов: формирование, постобработка и возможные применения в качестве дифракционных микрорешеток. <i>А. В. Достовалов, В. П. Корольков, С. А. Бабин</i> .....	122
3.7. Дифракционно-рефракционные хрусталики глаза с расширенной фокальной областью. <i>Г. А. Ленкова</i> .....	127
3.8. Психофизическое преобразование плоского изображения в объемное. <i>Г. Г. Голенко</i> .....	131
3.9. Индикатор дополненной реальности на основе световодной пластины с пропускающими ДОЭ. <i>Я. А. Град, В. В. Николаев, С. Б. Одинокоев, А. Б. Соломашенко</i> .....	133
3.10. Перцептивные зрительные aberrации. <i>Г. Г. Голенко</i> .....	138
3.11. Лазерная связь в условиях города, основанная на использовании орбитального углового момента. <i>Г. К. Красин, М. С. Ковалев, С. Б. Одинокоев, И. Ю. Филиппов, В. Д. Чебурканов</i> .....	142

### 4. Объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии

4.1. Состояние и тенденции развития технологий получения светосильных дифракционных решеток. <i>А. В. Лукин, А. Н. Мельников</i> .....	149
4.2. Дифракционный метод контроля поверхностных нано и микроструктур компьютерно-синтезированных голограмм. <i>Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов</i> .....	150
4.3. Исследование коррекционных возможностей вогнутой голограммной дифракционной решетки в схеме малогабаритного спектрофлуориметра. <i>Н. К. Павлычева, Р. Р. Ахметгалеева</i> .....	154
4.4. Экспериментальное исследование характеристик модулятора лазерного излучения с применением схемы из двух фазовых прямоугольных дифракционных решеток. <i>В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов, Н. В. Суетин</i> .....	158
4.5. Формирование и свойства элементов на основе периодических структур и элементов с произвольной формой поверхности в фотополимерах голографическими методами. <i>Н. Д. Ворзובהва, В. О. Веселов, П. П. Соколов</i> .....	162
4.6. Моделирование и экспериментальное исследование разрушения сферической полистироловой микрочастицы в импульсном ультрафиолетовом лазерном пучке. <i>В. С. Васильев, Р. В. Скиданов</i> .....	164
4.7. Технологии дифракционной коррекции изображения в разработке фотошаблонов для УФ фотолитографии. <i>Н. Н. Балан</i> .....	169
4.8. Экспериментальное изучение зависимости коэффициента усиления предметной световой волны от толщины и ориентационного угла кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ для его эффективного использования в голографических приложениях. <i>В. В. Шенелевич, А. В. Макаревич, С. М. Шандаров</i> .....	176

4.9. Особенности экспериментальных проверок спектральных характеристик малогабаритного спектрографа на основе вогнутой голограммной дифракционной решётки. <i>К. С. Коренной</i> .....	180
4.10. Моделирование интерференционного поля в фотослое на поглощающей подложке. <i>А. Р. Ахметов, А. И. Любимов, А. Р. Шамсутдинов</i> .....	183
4.11. Варианты оптической схемы светосильного изображающего спектрографа с выпуклой голограммной решеткой. <i>А. Н. Мельников, Э. Р. Муслимов</i> .....	188

## 5. Голограммные и дифракционные оптические элементы: методы компьютерного синтеза, метаматериалы, плазмонные структуры и технологии изготовления

5.1. Обратимые и необратимые изменения оптических параметров образцов полимерного материала «Диффен», обусловленные воздействием излучения. <i>О. В. Андреева, Б. Г. Манухин, Н. В. Андреева</i> . 195	
5.2. Изобразительные голограммы на бихромате желатины. <i>С. А. Шойдин</i> .....	198
5.3. Дифракционные и интерферометрические методы исследования периодически поляризованных доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития. <i>С. М. Шандаров, А. Е. Мандель, Е. Н. Савченков, М. В. Бородин, С. В. Смирнов, А. Р. Атматханов, В. Я. Шур</i> .....	203
5.4. Оптимизация экспериментального электрооптического деспеклера на основе негеликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла. <i>А. Л. Андреев, Н. В. Заляпин, Т. Б. Андреева, И. Н. Компанец</i> .....	210
5.5. Голографический нанокпозиционный материал. <i>Е. Б. Шекланова, М. И. Фокина, Ю. Э. Бурункова, В. О. Калябин, И. Ю. Денисюк</i> .....	215
5.6. Трёхмерные нанокпозиционные голограммы. <i>Е. Б. Шекланова, М. И. Фокина, Д. И. Жук, Ю. Э. Бурункова, В. О. Калябин, И. Ю. Денисюк</i> .....	217
5.7. Особенности создания дифракционного микрорельефа на поверхности пищевых продуктов. <i>А. П. Торопова, М. И. Фокина</i> .....	219
5.8. Стабилизация желатиновых голограмм и их защита от атмосферной влаги. <i>А. Н. Малов</i> .....	222
5.9. Лазер с обращением волнового фронта для записи голограмм. <i>И. А. Горбунова, С. О. Поташин, А. П. Погода, А. В. Федин, А. С. Борейшо</i> .....	223
5.10. Обоснование возможности изготовления полноцветной изобразительной голограммы с использованием цветной интерференционной фотографии Липпмана. <i>А. И. Шварцвальд</i> .....	226
5.11. Голографическая запись в тонких слоях полифторированных халконов и их оптические свойства. <i>С. В. Деревяшкин, Е. А. Соболева, В. В. Шелковников</i> .....	229

## 6. Голографическая интерферометрия, голографическая память и оптико-голографическая обработка информации

6.1. Интерферометрический контроль юстировки оптической системы с эксцентрично расположенной асферической линзой. <i>Р. К. Насыров, А. Г. Полещук, М. Н. Сокольский, В. П. Трегуб</i> .....	233
6.2. Анализ выявления общих фрагментов в последовательности образов наложенными объемными голограммами Фурье: феномен когнитивного насыщения. <i>А. В. Павлов</i> .....	237
6.3. Применение амплитудных масок для улучшения характеристик систем оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. <i>Н. Н. Евтихийев, В. В. Краснов, А. В. Шифрина</i> .....	245
6.4. Некогерентный коррелятор с использованием микрозеркального модулятора для отображения голографических фильтров. <i>Д. Ю. Молодцов, В. В. Краснов, П. А. Черёмхин, В. Г. Родин</i> .....	248
6.5. Способ диагностики внутренней структуры композитных материалов по анализу параметров цифровых спекл-фотографий. <i>А. Н. Малов, П. В. Павлов, М. О. Астахов</i> .....	251
6.6. Исследование паразитных акустических резонансов интегрально-оптических модуляторов методами голографической интерферометрии. <i>А. В. Варламов, М. Ю. Плотников, А. С. Алейник, П. М. Агрузов, И. В. Ильичев, А. В. Шамрай</i> .....	255
6.7. Применение цифровой спекл-интерферометрии для поузловой отработки конструкционной прочности деталей турбомашин. <i>А. И. Жужукин</i> .....	259
6.8. Многочастотный активный нелинейный резонатор на основе самоаффинного рельефа. <i>Г. Н. Лукьянов, И. Н. Серов, А. В. Копыльцов, В. Т. Барченко</i> .....	262



# 1. Современные тенденции развития голографии и голографических технологий



## 1.1. Голографический метод записи голограмм во встречных пучках и его применение в Республике Беларусь (к 90-летию со дня рождения Ю. Н. Денисюка)

Л. В. Танин<sup>1,2</sup>, В. А. Танин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ЗАО «Голографическая индустрия», Минск, Беларусь

<sup>2</sup> ООО «Магия света», Минск, Беларусь

В докладе сообщается об основных этапах развития и использования отражательной голографии Ю. Н. Денисюка в Республике Беларусь.

**Ключевые слова:** Отражательная голограмма, Голографическая выставка, Голографический промышленный образец, Голограмма православных святых, Голограмма наглядных учебных пособий, Патенты, Способы формирования изображений.

Голография имеет глубокие исторические корни, ибо в ее основе лежат исследования многих ученых, в том числе и Нобелевских лауреатов. Так, например, Деннис Габор — английский ученый венгерского происхождения, работая над проблемой усовершенствования электронного микроскопа, в 1947 году сделал изобретение, которому дал название *holography* (др.-греч. *όλος* — полный + *γράφω* — пишу), за которое в 1971 году был удостоен Нобелевской премии. Одним из своих предшественников Деннис Габор назвал Лоуренса Брэгга, которому удалось, используя рентгеновские лучи, получить оптическое изображение атомной структуры. В то же время ключ к объяснению принципов объемной голографии можно также найти в тех методах цветной фотографии, за которые в 1908 году получил Нобелевскую премию Габриель Лип-

манн. Обобщая и сочетая идеи Липманна и Брэгга, советский ученый *Юрий Николаевич Денисюк* открыл новое явление, названное им волновой фотографией, на основе которого им были получены отражательные голограммы, позволяющие восстанавливать записанные на них изображения при освещении «белым» светом, а не при монохроматическом освещении, как это требуется обычно. Идея создания данных голограмм принадлежит Ю. Н. Денисюку. Поэтому голограммы этого типа известны под именем их создателя.

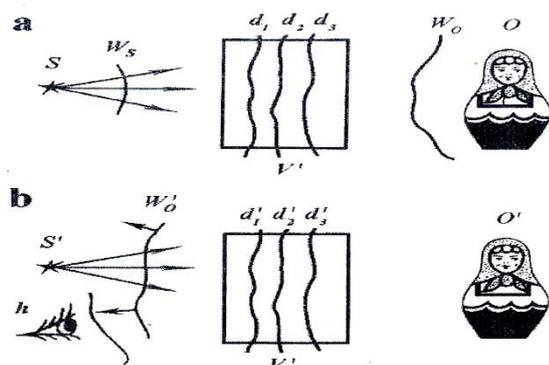
Голографический метод записи во встречных пучках в трехмерной светочувствительной среде позволяет воссоздать оптическую копию реального предмета. Трехмерность изображения придает иллюзии удивительную достоверность. Технология производства голограмм не обходится без лазеров и современных высокоразрешающих фотоэмульсий. При этом изображения предметов глубиной в несколько метров воспроизводятся голографическим фотоэмульсионным слоем толщиной порядка 10 мкм. Как только мы осветим голограмму пучком света, за ней тотчас возникает объемное изображение, ничем не отличающееся от настоящего предмета. Различимы малейшие детали. Воссоздается полный эффект присутствия. Оптическую копию можно рассматривать под разными углами, что незаменимо для демонстрации уникальных предметов.

Многие достижения вначале относились к фантастическим представлениям людей, а Юрию Николаевичу Денисюку удалось сделать это реальностью.

Значительно меньше, но мне в жизни также повезло. Мое увлечение голографией началось в студенческие годы, в 1967 году, когда я прочел статью Ю. Н. Денисюка в журнале «Техника молодежи» о методе записи объемных изображений и загорелся всерьез. В то время как мои сокурсники мечтали о научных открытиях в области ядерной и лазерной физики, фотобиологии, меня притянула как магнитом голография. В то время в университете даже курса такого не существовало. Оглядываясь назад, утверждаюсь в мысли, что мой путь был predetermined какой-то интуитивной юношеской мечтой и верой в будущее голографии, истинной увлеченностью. Заведующий кафедрой оптики и спектроскопии Ленинградского государственного университета, член-корреспондент Академии наук СССР *Сергей Эдуардович Фриш* порекомендовал меня для обучения основам голографии



Рис. 1. Фотография Ю. Н. Денисюка



а — схема записи голограммы во встречных пучках;  
б — схема восстановления объемного изображения

Рис. 2.

Юрию Николаевичу Денисюку (ГОИ им. С. И. Вавилова) и Юрию Исаевичу Островскому (ЛФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР). Этот период правильно охарактеризовала Галя Всеволодовна Островская, назвав свою статью «Романтика научных будней (начальный этап развития голографии, с начала 60-ых до середины 70-х гг. прошлого века)» в сборнике трудов, посвященных 80-летию со дня рождения выдающегося физика России — академика Юрия Николаевича Денисюка, которое отмечалось в 2007 году, через год после его кончины. Я через всю жизнь пронес благодарность в сердце своим учителям: Юрию Исаевичу Островскому и Юрию Николаевичу Денисюку.

В 1976 году я возвращаюсь после учебы в аспирантуре Ленинградского Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе АН СССР в Беларусь, г. Минск, в Институт физики АН БССР. В это время я начал создавать технологию промышленного выпуска голограмм во встречных пучках.

С 13 февраля по 17 марта 1978 года в г. Минске сначала в Выставочном зале АН БССР, а затем на ВДНХ БССР была проведена первая в СССР выставка художественных голограмм «Голография-78», организованная Институтом физики АН БССР и Научным советом АН СССР по проблеме «Голография». В рамках этой выставки было представлено 50 голограмм, созданных советскими учеными, работавшими в таких организациях, как Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова, Всесоюзный научно-исследовательский кинофотоинститут, Ленинградский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова АН СССР, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе АН СССР, Институт физики АН БССР.

В экспозицию выставки вошли голограммы крупных размеров ( $1,8 \times 1,2 \text{ м}^2$ ), псевдоцветные голограммы, голографические портреты, интерферограммы, иллюстрирующие применения голографии в технике, голограммы, формирующие объемные предэкранные ортоскопические изображения объектов. Большинство представленных голограмм были записаны по методу Ю. Н. Денисюка, основателя художественной голографии.

Объектами при съемке голограмм служили уникальные произведения искусства и архитектуры, сокровища Эрмитажа и Артиллерийского исторического музея, Алмазного фонда СССР, Московского музея культуры народов Востока и т. к. Выставка вызвала небывалый ажиотаж и продемонстрировала высокий уровень развития художественной голографии, а также достижения нашей страны в области разработки высококоразрешающих фотоматериалов и когерентных источников света.

Несмотря на холодную погоду, люди стояли в очереди по шесть часов, чтобы увидеть голографическую экспозицию. Всего за месяц с небольшим выставку посетило более 50 тыс. человек. Гостями выставки стали крупные государственные деятели, ученые, художники и писатели. Экспонаты пользовались большим успехом среди ученых, инженерно-технических работников, деятелей культуры и искусства, преподавателей и студентов высших и средних учебных заведений. Выставка вызвала живой интерес также у представителей ряда зарубежных стран. Они отметили высокий технический и художественный уровень, представленных экспонатов и проявили большую заинтересованность в скорейшем и непосредственном использовании изобразительных средств голографии для организации музеев, выставок, для изготовления сувенирной продукции, наглядных учебных пособий, для технических приложений, оформлении реклам, стендов и т. д.

Классик белорусской литературы, писатель Владимир Короткевич оставил в книге отзывов красноречивую надпись: «Думал, что уже отвык чему-либо удивляться. Но тут — удивился. До глубины души. Страшно интересная выставка!»

Удивительный успех, который имела минская выставка 1978 года, положила начало целому ряду выставок советской голографии, которые в последующие годы объездили 17 стран мира, везде приобретая большую популярность. Выставки «Голография в СССР», проводившиеся при моем участии, побывали в Австрии, Дании, Великобритании, Австралии, Японии, Финляндии и многих других странах.

Голография успешно развивалась во всем мире, и интерес к новым открытиям и возможностям был взаимным между учеными разных стран. Так в 1991 году американская сторона проявила интерес к нашим отечественным достижениям. Я по поручению Ю. Н. Денисюка представлял в Америке голограммы, сделанные в СССР (Ленинград, Москва, Киев, Минск, Тбилиси, Новосибирск).

Интерес к художественной голографии в мире продолжал расти. В связи с этим вслед за Америкой я представлял отечественные достижения и в других странах.

В 1992 году мной совместно с другими белорусскими учеными и специалистами в области оптической голографии было создано уникальное научно-производственное предприятие ООО «Магия света». И вот

уже 25 лет ООО «Магия света» удивляет своим волшебством в мире голографических объемных изображений постоянных посетителей выставок художественной голографии в ряде стран мира: во Франции (в Париже, в Форум де Халес), в США (в Сан-Франциско, Голографическая галерея), в Германии (в Берлине, «Европа-центр»), в Японии (в Токио, фирма Лайт Дайменшз) и т. д.

Одна из наших разработок — это создание способов формирования изображений, заключающихся в получении комбинированных объемных и плоских изображений, которые могут быть использованы для визуализации различных объектов. Способы формирования изображения усиливают эффект восприятия оптической информации. Усиление эффекта восприятия достигается за счет получения комбинированных объемных и плоских изображений, взаимно дополняющих друг друга.

Данные способы позволяют формировать и восстанавливать комбинированные изображения в объеме, цвете и движении. Они обеспечивают непрерывное поступление видимой информации с одновременным регулированием ее объема. Непрерывное поступление информации обеспечивается наличием плоского изображения объекта, а дополнительная информация об объекте содержится в голографическом изображении.

Уникальность способа формирования изображения заключается в том, что при использовании источника с регулируемыми характеристиками излучения (интенсивности, когерентности, спектрального состава, поляризации) появляется возможность формирования и восстановления изображений, а также управления процессом восстановления и селекции записанной информации.

Комбинированные изображения могут применяться в системах хранения информации, для пространственного разделения образов в системах индикации, при конструировании художественных панорам, в создании и размножении копий произведений искусства, регистрации голографических портретов, в рекламе, а также для изготовления наглядных и учебных пособий, технических стендов, сувениров и т. д.

Сегодня эта идея реализуется в новом проекте, связанном с записью крупноформатной отражательной голограммы Креста Преподобной Ефросинии княжны Полоцкой. Впервые благодаря совместным усилиям ученых и специалистов ООО «Магия света» и Национальной академии наук Беларуси при поддержке Православной церкви воспроизведен голографический образ одного из величайших достояний белорусского народа и всего христианства — Креста Преподобной Ефросинии княжны Полоцкой (авторы записи голограммы Л. В. Танин и С. Н. Гинак).

«Способы формирования изображений» запатентованы в России, США, Франции, Германии, Чехии, Болгарии и др.

В Патентном ведомстве Республики Беларуси в 1993 году зарегистрирована под № 93-10001 передача части патентных прав на изобретение «Способы формирования изображений» зарубежным фирмам (в частности, Samsung Electronics Corporation, Ltd.).

Это изобретение было реализовано нами в первом голографическом промышленном образце в СССР (авторское свидетельство № 10534 от 20 мая 1980 г.) «Олимпийский голографический знак». На основе описанных способов к XXII Олимпийским играм в г. Москве в 1980 г. была разработана технология и был налажен серийный выпуск голографических знаков Минским механическим заводом им. С. И. Вавилова (было выпущено около 3 тыс. штук). Основная идея состояла в том, что на плоскую подложку наносилось фотолитографическое изображение с олимпийской символикой.

На голографическую пластинку записывали объемное изображение олимпийской символики. Затем голограмма накладывалась на подложку с фотолитографическим изображением так, чтобы контуры этих изображений совпали.

Начиная с 2010 года, в работу в области оптической голографии включился Вячеслав Андреевич Танин, он начал проявлять активный интерес к научным разработкам в сфере художественной и защитной голографии и принимать активное участие в реализуемых проектах ООО «Магия света» и ЗАО «Голографическая индустрия». Так при его непосредственном участии были организована первая в Беларуси Международная научно-практическая конференция «ГолоЭкспо-2011» и Международная выставка художественных голограмм.

29–30 сентября 2011 года в Минске состоялась 8-ая Международная научно-практическая конференция «ГолоЭкспо-2011» «Голография. Наука и практика», посвященная теоретическим и прикладным аспектам современной голографии. В ходе данной конференции, которая впервые прошла в Беларуси, выступили с докладами ведущие ученые и специалисты в области голографии из *Беларуси, России, Украины, Великобритании, Франции, США, Индии, Португалии, Болгарии* и других стран. Конференция работала полных два дня, 29 и 30 сентября, и стала одним из крупнейших научных форумов этого года.

Устроителями конференции стали четыре организации: ГНУ «Институт физики имени Б. И. Степанова» Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь); ЗАО «Голографическая индустрия» (г. Минск, Республика Беларусь); ООО «Магия света» (г. Минск, Республика Беларусь); ООО «Голография-Сервис» (г. Москва, Россия).

Особо была отмечена поддержка со стороны Мингорисполкома, Национальной академии наук Беларуси, Белорусского государственного университета, Белорусского оптико-механического объединения (г.

Минск, Республика Беларусь), Международной ассоциации производителей голограмм (ИМА), а также лично в то время премьер-министра Республики Беларусь, доктора экономических наук, профессора *Михаила Владимировича Мясниковича* (ныне — Председатель Совета Республики Национального собрания Республики Беларусь шестого созыва).

В рамках конференции состоялось вручение медалей Юрия Николаевича Денисюка «За выдающиеся достижения в области голографии» исполнительным директором Оптического общества им. Д. С. Рождественского *Владимиром Михайловичем Арпишкиным*; шесть выдающихся деятелей в области голографии из разных стран мира были удостоены этой высокой награды.

Медали Ю. Н. Денисюка были вручены *Гансу Бельхагену* (NEWI and OptIC, Centre for Modern Optics, Лондон, Великобритания), *Анне-Мари Кристакис* (Музей голографии, г. Париж, Франция), *Джону Колфилду* (Diversified Research Corporation, Нэшвилл, США), *Гале Всеволодовне Островской* (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия), *Сергею Борисовичу Одинокону* (лаборатория «Оптико-голографические системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия).

Единственным белорусским ученым, получившим эту почетную награду, стал основатель художественной и защитной голографии в Беларуси, учредитель ООО «Магия Света» и ЗАО «Голографическая Индустрия», председатель Совета директоров ЗАО «Голографическая индустрия», академик Международной инженерной академии, доктор физико-математических наук *Леонид Викторович Танин* (г. Минск, Республика Беларусь).

*8-ая Международная конференция «ГолоЭкспо-2011», которая в впервые прошла в Республике Беларусь, поставила сразу несколько рекордов по мнению* председателя Организационного комитета, заведующего лабораторией «Оптико-голографические системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана, члена-корреспондента Международной академии информатизации, доктора технических наук, профессора С. Б. Одинокова (г. Москва, Россия), а именно по количеству зарегистрированных *участников конференции — 160 человек, наибольшее число за все годы ее существования, которыми был представлен 121 доклад — это также рекорд.*

1 октября 2011 г., в выставочном зале Национальной академии наук Беларуси состоялось открытие Международной выставки художественных голограмм «Голография-2011», посвященной памяти Юрия Николаевича Денисюка — выдающегося ученого в области голографии, создателя отражательной голографии, академика Российской академии наук. Данная выставка является продолжением конференции и на практике демонстрирует одно из многочисленных применений оптической голографии.

В открытии выставки приняли участие заместитель председателя Мингорисполкома *Александр Михайлович Борисенко*, 1-й заместитель председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси, академик НАН Б *Петр Александрович Витязь* и председатель Организационного комитета 8-й Международной конференции «ГолоЭкспо-2011» и Международной выставки художественных голограмм «Голография-2011» *Леонид Викторович Танин*.

В церемонии открытия выставки также приняли участие видные ученые и специалисты в области голографии из разных стран мира, в том числе: профессор *Джон Колфилд* (Diversified Research Corporation, Нэшвилл, США), *Ганс Бельхаген* (NEWI and OptIC, Centre for Modern Optics, г. Лондон, Великобритания), директор Музея голографии *Анне-Мари Кристакис* (г. Париж, Франция), начальник лаборатории изобразительной голографии «Государственный Оптический Институт им. С. И. Вавилова» *Михаил Константинович Шевцов* (г. Санкт-Петербург, Россия), директор «Geola uab.» *Стас Захаровас* (г. Вильнюс, Литва), директор Греческого голографического института *Алкис Лембессис* (г. Афины, Греция), художницы *Перл Джон* (Великобритания) и *Изабель Азеведо* (Португалия), и многие другие.

На открытии выставки присутствовали репортеры ведущих информационных агентств, газет и телеканалов Республики Беларусь. С их репортажами и статьями об открытии конференции можно было ознакомиться в информационных материалах ведущих СМИ Беларуси, России, Украины и зарубежных стран.

В ходе Международной выставки художественных голограмм «Голография-2011» белорусской обществу были представлены лучшие произведения художественной голографии из Австралии, Беларуси, Бельгии, Великобритании, Германии, Греции, Испании, Канады, Китая, Литвы, Нидерландов, Португалии, России, Румынии, США, Турции, Украины, Франции, Швеции и Японии, всего — более 150 работ из 20 стран. Беларусь на выставке была представлена голограммами, созданными на ООО «Магия Света».

Эта выставка является беспрецедентным мероприятием не только для Беларуси, но и для всего мира — до настоящего момента в истории художественной голографии не было аналогов данной экспозиции по количеству и разнообразию представленных экспонатов. Международной выставка художественных голограмм «Голография-2011» принимала многочисленных посетителей на протяжении 2 месяцев. За это время её посетило более ста тысяч людей.

Совместными усилиями специалистов ЗАО «Голографическая индустрия» и ООО «Магия света», под руководством и при активном участии Танина Вячеслава Андреевича был также организован и проведен ряд выставок как в Республике Беларусь, так и за ее пределами:

— Республика Беларусь (Витебск, 2012 г.) «Голография-2012, Витебск»;

– Республика Казахстан, (Астана, 2012 г.) «Голография-2012»;

– Республика Беларусь (Гомель, 2013 г.) «Голография-2013, Гомель»;

– Республика Беларусь (Гродно, 2014 г.) «Голография-2014, Гродно»;

– Республика Беларусь (Минск, 2014 г.) «Голография-2014, Минск»;

– Республика Беларусь (Жодино, 2015 г.) «Голография-2015, Жодино»;

– а также специализированные выставки по защитной голографии «ГолоЭкспо» 2007–2011 гг. (Москва, Киев, Минск) и др.

Стоит отметить отличительный успех каждой из этих выставок, как и в 1978 г., тысячи людей стояли в очередях, чтобы соприкоснуться с волшебством XX-го столетия.

Отдельно стоит отметить совместную инициативу и деятельность православной церкви и голографистов Республики Беларусь по сохранению православных святынь, так как окончательная цель развития любого общества — высшее объединение обеих областей, синтез всего духовного мира: мира науки и мира религии. Так, руководствуясь данной целью на базе ООО «Магия света» и ЗАО «Голографическая индустрия» эта идея была воплощена в жизнь: объединить голографию и православие в одном проекте, с помощью науки прославить христианские реликвии, сделать их доступными для большего количества людей. Данная работа в Беларуси началась в 1979 г., с записи голограммы Потира XVI в. из коллекции Национального художественного музея Республики Беларусь (который в то время носил имя Государственный художественный музей).

Само развитие художественной голографии в Беларуси было тесно связано с созданием объемных голографических копий икон, распятий, храмов и других памятников Православия и Христианства.

В советские годы многие православные святыни оказались разбросаны по запасникам музеев и частным коллекциям. Миссия голографии в тот период заключалась в том, чтобы создать объемные копии данных объектов, и таким образом запечатлеть их визуальный облик и сохранить память о них, а также дать возможность верующим людям увидеть образы икон и распятий, доступ к которым был ограничен.

Особой гордостью, равно как и примером плодотворного и успешного сотрудничества церкви и науки, является создание голограммы Креста преподобной Евфросинии Полоцкой, являющегося Православной святыней и национальным символом белорусов. Для реализации данного проекта было получено позволение и благословение Его Высокопреосвященства Митрополита Минского и Слуцкого Филарета, Патриаршего Экзарха всея Беларуси. Заказчиком изготовления голограммы выступила Национальная академия наук Беларуси, а инициатором — Председатель Президиума НАН Б Михаил Владимирович Мясникович

(ныне — Председатель Совета Республики Национального собрания Республики Беларусь шестого созыва). Также инициатором и со-руководителем проекта стал Настоятель Всехсвятского храма протоиерей Фёдор Повный.

В сопровождении монахинь и вооруженной охраны Крест был доставлен из Спасо-Преображенской церкви Полоцкого Спасо-Евфросиньевского женского монастыря, где он постоянно хранится, в голографическую студию «Магия света» в Минске. Для реализации голографической съемки данного объекта достаточно крупного размера ( $51 \times 21 \text{ см}^2$ ) потребовалась слаженная работа ведущих ученых и специалистов Беларуси в области голографии. Результатом стала самая крупная голограмма, записанная в Беларуси ( $60 \times 40 \text{ см}^2$ ).

Успех проделанной работы вдохновил на дальнейшие проекты в данном направлении, были сделаны голограммы других редчайших православных святынь, например, в 2013 г. была проведена уникальная съемка голограммы святыни «Дары волхвов», которая была привезена в г. Минск из монастыря святого Павла на горе Афон в Греции.

Особое внимание хочется обратить на то, что идея сохранения православных святынь нашла свои отклик не только в Республике Беларусь. Так в 2011 г. было принято решение о начале Международного проекта «Сохраним сокровища Православия с помощью голографии», в котором принимают участие голографисты Греции, России, Беларуси, Украины, Болгарии и других православных стран. Работа, проделанная в Беларуси по сохранению Православных святынь средствами голографии, не осталась незамеченной, и мне, как руководителю данного направления в Беларуси, предложили стать председателем Международного оргкомитета и руководителем этого Международного проекта.

В мае 2012 г. предприятие «Магия света» были изготовлены еще две голограммы двустороннего наперсного крестяного креста XV — нач. XVI вв., найденного при археологических раскопках в г. Витебске (Беларусь). Данный крест является одним из ценнейших экспонатов Витебского областного краеведческого музея, и является как реликвией республиканского масштаба, так и святыней для православных верующих Витебской епархии.

Сейчас разрабатывается проект использования голограмм в композиции Всехсвятского храма г. Минска при участии настоятеля храма, протоиерея Фёдора Повного. Также было запланировано создание голограмм двух великих святынь Беларуси. Голограмма нерукотворной Жировичской иконы Божией Матери (1470 г.) — уже изготовлена, а голограмма Купятицкой иконы Божией Матери (XVII в.) находится в стадии разработки.

В настоящий момент коллектив ООО «Магия света» работает над новым проектом в области школьного образования и хочет внедрить данную разработку наглядного пособия нового типа в белорусских школах.

Цель данного проекта найти способы, методы и пути воодушевить молодежь страны на новые научные поиски, пробудить в них страсть и любовь к знаниям, сделать процесс обучения интересным и увлекательным. Для этого ООО «Магия света» уже разработаны прототипы учебных пособий по предмету биология, а именно голографические изображения расчлененного речного рака и скелета травяной лягушки, голограммы «Жук-слон» и «Архиаптерикс», которые позволяют до мельчайших деталей рассмотреть изучаемый объект, что наглядно доказывает преимущества такого рода наглядных пособий перед классическими аналогами.

29–30 мая 2017 года в г. Москва состоялся IV форум регионов России и Беларуси, на котором ООО «Магия света» представило голографические наглядные учебные пособия в рамках экспозиции Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь.

Важно отметить, что научные разработки, проводимые в области голографии в Республике Беларусь, не остаются без внимания государства и общества. Так труд ведущих специалистов ООО «Магия света» Л. В. Танина и С. Н. Гинака был отмечен Президентом

Республики Беларусь Специальной премией за значимый вклад в сохранение национальных культурных традиций и создание визуальных образов православных святынь с помощью голографических технологий.

Православная церковь, со своей стороны, также высоко оценила вклад в сохранение православных святынь, переосмысление вековых традиций в современных технологиях воссоздания икон и церковных реликвий, удостоив меня Ордена креста Преподобной Ефросинии Полоцкой, высшей награды белорусской церкви.

Всё изложенное выше свидетельствует о заинтересованности в такой достаточно перспективной отрасли физики как голография и результатах ее развития, а это значит, что у молодых ученых, занятых в данной сфере есть множество возможностей проявить себя и свои способности на этом поприще, перенять эстафету у нынешнего поколения голографистов и нести ее дальше в будущее, не сдавая заданного темпа, к новым открытиям, чтобы невозможное сейчас сделать возможным для будущих поколений *в память о нашем великом Учителе Юрии Николаевиче Денисюке.*

## **Holographic method of hologram recording in colliding beams and its application in Republic of Belarus (Devoted to the 90th anniversary of the birth of Y. N. Denisyuk)**

*L. V. Tanin<sup>1,2</sup>, V. A. Tanin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Holographic Industry, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup> *Light magic, Minsk, Belarus*

The report is on the main stages of development and use of reflective holography by Y. N. Denisyuk in the Republic of Belarus.

**Keywords:** Reflective hologram, Holographic display, Holographic production prototype, Hologram of Orthodox sacred things, Hologram of visual teaching aids, Patents, methods of image formation.

## 1.2. Голография без голографии. Мифы и реальность

Ю. Н. Овечкис

Московский политехнический университет, Москва, Россия

В докладе приведены сведения о системах и устройствах, часто представляемых как голографические, но демонстрирующих плоские изображения, воспринимаемые объемными благодаря особенностям их показа таким, как скрытые и прозрачные экраны, динамика показа, адаптация к положению наблюдателя. Приводятся также сведения о идейно близких к голографическим пленоптических устройствах регистрирующие световые пучки.

**Ключевые слова:** Объемное изображение, 3D, Голография, Экран, Проекция, Пленоптика.

Системы воспроизведения объемных изображений (или как их называют 3D) без применения очков и других специальных приспособлений всегда привлекали внимание и вызвали большой интерес, как у разработчиков, так и потребителей подобной техники вследствие полной реалистичности не только самого изображения, но и способа его предъявления. Подобные системы могут и частично уже используются в рекламе, на выставках, телевидении, а также в различных технических приложениях, системах обучения, тренажерах т. д.

Однако часто имеет место подмены действительно объемных изображений, в том числе голографических, плоскими, но демонстрируемыми таким образом, что наблюдатель может воспринимать их как объемные, висящие в воздухе [1–5]. В рекламных буклетах, брошюрах и пр. такие устройства и изображения позиционируют как 3D, и часто используют термин голография и производные от него. При этом к научному направлению голографии, интерференционному способу регистрации и восстановления волн, открытому Д. Габором, Ю. Н. Денисюком и развиваемому многими выдающимися отечественными и зарубежными учеными, данные системы не имеют никакого отношения.

Иллюзия объемности плоского изображения возникает благодаря некоторым особенностям его демонстрации — использованию прозрачного или скрытого экрана, вследствие чего объект воспринимается как бы висящим в воздухе. Часто осуществляют непрерывное горизонтальное вращение изображаемого объекта или изменение его ракурсов в соответствии со смещением взгляда наблюдателя, за которым производится слежение. Однако в каждый момент времени наблюдаемая картинка плоская.

В связи с этим, чтобы избежать неопределенности, дадим определение объемному (3D) изображению, имея в виду, что оно должно обеспечивать возможность визуально определить пространственное расположение элементов отображаемой сцены. Изображение будем называть объемным, если наблюдателю одновременно предъявляются два различных ракурса, соответствующих положению его глаз. При этом одно-

временность понимается с физиологической точки зрения. Т. е. возможна и попеременная демонстрация ракурсов, но достаточно быстрая, чтобы наблюдатель воспринимал слитность показа.

В докладе приводятся различные реализации устройств — «голографические» проекционные пленки [2, 3] и призмы [4, 5], «голографическое» телевидение [6], «голографические» устройства со сферическими зеркалами с показом плоских изображений, сформированных по законам исключительно лучевой оптики. «Голографическим» часто называют обычный стереоскопический дисплей с очками, снабженный системой слежения за положением головы наблюдателя и соответствующей адаптивной корректировкой ракурсов формируемого на экране изображения [7].

В докладе также описываются основы пленоптического способа регистрации светового поля [8], который по своему назначению действительно близок к голографии. Способ сочетает в себе обычную цифровую фотографию с интегральной фотографией Липпмана. Съемка осуществляется объективом с полностью открытой диафрагмой через растр, состоящий из большого количества сферических микролинз на высоко разрешающую ПЗС матрицу. Специально разработанное программное обеспечение позволяет по полученному изображению на ПЗС матрице с учетом известных координат расположения микролинз расчетным методом определить направление и интенсивность световых пучков, исходящих из объектива, т. е. получить виртуальную модель светового поля за объективом.

С полученными таким образом изображениями можно производить всевозможные преобразования — производить перефокусировку, менять глубину резкости, устанавливать виртуальные диафрагмы произвольной формы. Допустимо также получать множество одноракурсных изображений в пределах апертуры съемочного объектива с последующим их переводом в голографическое или автостереоскопическое линзорастровое многоракурсное объемное изображение.

Слово «пленоптика» весьма родственно термину «голография» и происходит от латинского «пленус» — полный и древне греческого «оптикус» — зрительный.

### Список источников

- [1] Чекалин, Д. Г. Особенности восприятия, способы демонстрации и современные технологии воспроизведения объемных изображений // Мир техники кино. — 2017. — Том II. — № 1 — С. 19–20.
- [2] URL: <http://www.iventashow.ru/service/additional/holo>.
- [3] URL: <http://waterstone.uz/golograficheskaya-video-proekciya>.

- [4] URL: <http://www.gefestcapital.ru/holopiramids.html>.
- [5] URL: <http://www.evolutionmusic.ru/3d-piramid.html>.
- [6] URL: <http://www.holography.by/infocenter/news/2009/150>.
- [7] **Кувшинов, С. В.** Образование XXI века: от трёхмерного восприятия к трёхмерному мышлению / С. В. Кувшинов, К. В. Харин // Мир техники кино. — 2016. — Том 10. — № 2 — С. 15–20.
- [8] **Ватолин, Д. С.** Рендеринг фокуса, разрешения, формы диафрагмы, формы затвора пленоптических камер // Мир техники кино. — 2016. — Том 10. — № 4. — С. 14–21.

## **Holography without holography. Myths and reality**

*Y. N. Ovechkis*

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

The report includes data about systems and devices that are often presented as holographic, but showing a flat image, and perceived as volume due to the peculiarities of their display as hidden and transparent screens, the dynamics of the show and the adaptation to the position of the observer. Also provides information about ideologically close to the holographic plenoptic devices registered light beams.

**Keywords:** Volume image, 3D, Holograpgy, Screen, Projection, Plenoptics.

### 1.3. Последние достижения в области изготовления объемных многоцветных защитных голограмм на тонкопленочных фотополимерных носителях

А. В. Смирнов<sup>1</sup>, Б. В. Акимов<sup>1</sup>, С. Б. Одинокоев<sup>2</sup>, Д. С. Лушников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НПО «Криптен», Дубна, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

С момента разработки технологии массового тиражирования радужных голограмм в 1977 году прошло уже 40 лет и за это время индустрия оптически-переменных защитных элементов для защищенной полиграфии сильно эволюционировала. Радужная голограмма долгое время занимала лидирующие позиции среди оптически-переменных защитных элементов и широко распространилась на разных видах защищаемых изделий, начиная от пластиковых платежных карт и заканчивая паспортами и идентификационными документами по всему миру.

Радужные голографические защитные элементы усложнялись с течением времени, насыщались сложными для имитации и подделки эффектами, интегрировались с альтернативными и печатными защитными элементами. Это оказалось не самым эффективным решением для использования и распознавания обычными людьми, потому что многое из того, что применялось для защиты полиграфических изделий, было перегружено сложными для восприятия признаками и эффектами.

Более того, с момента широкого распространения радужной голограммы в качестве защиты упаковки, она перестала восприниматься, как действительное средство защиты документов, банкнот и прочих высокозащищенных от подделки полиграфических изделий.

С 2002 года меняется общемировая концепция защиты полиграфических изделий оптическими средствами защиты. Теперь пропагандируются высокотехнологичные решения интуитивно понятные, однозначно определяемые целевой аудиторией, а именно обычными людьми, построенные на эффектах объема и движения, не имитируемые средствами полиграфии. При этом технологии создания подобных элементов должны быть мало распространены, дорогостоящи, высокотехнологичны и не доступны поддельщикам.

В свете этой концепции голографические оптически-переменные элементы для полиграфии стали меняться и трендом последнего времени стало использование цветных объемных защитных голограмм в качестве решений для защищенной полиграфии. Уже сегодня можно видеть примеры использования фотополимерных объемных голограммных элементов для защиты идентификационных документов и банкнот разных стран.

Разработкой и изготовлением оптически-переменных защитных элементов на базе объемных фотополимерных голограмм занимаются признанные лидеры индустрии, такие как: OVD Kinegram, SURYS, DeLaRue, Dupont, DaiNippon.

В России НПО «Криптен», компания, являющаяся лидером рынка по производству оптических защитных элементов для полиграфии, занимается разработкой и изготовлением объемных голографических элементов на тонкой фотополимерной основе.

На базе НПО «Криптен» ведутся работы, как по производству, так и по разработке новых уникальных визуальных признаков и эффектов для продукции содержащей объемные фотополимерные голограммы. Чтобы объемная голограмма превратилась из изобразительной в защитную специалистами компании разработаны и внедрены различные элементы, эволюционировавшие из хорошо известных по радужной голограмме.

Методами компьютерного синтеза и моделирования были созданы различные голограммные защитные элементы, показанные на рисунках 2–5.

Помимо различных защитных элементов разработаны методы записи компьютерно-синтезированных однопараллаксных (рисунок 6) и полнопараллаксных



а) пластиковые документы



а) банкнота 50 шекелей Израиля

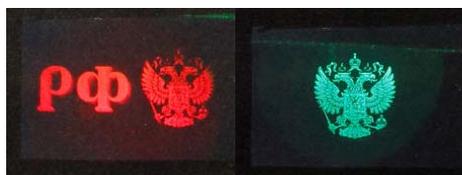


в) банкнота 50 франков Швейцарии

Рис. 1. Пластиковые документы и банкноты с голограммами



б) изменение цвета объекта при изменении угла зрения

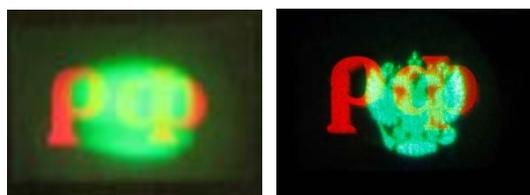


а) изменение цвета объекта и самого объекта

Рис. 2. Флип-флоп эффект

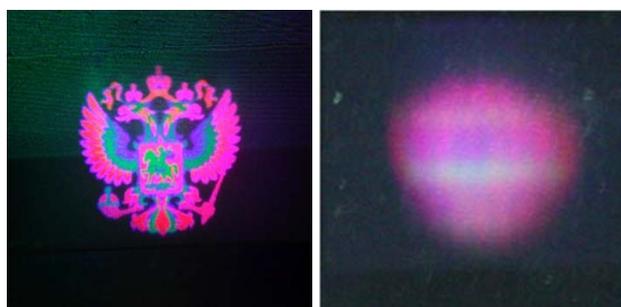


Рис. 3. Микротекст с флип-флоп эффектом



а) в диффузном свете б) в сфокусированном свете

Рис. 4. Плавающее несфокусированное изображение



а) восстановление с использованием спец. прибора б) восстановление в диффузном свете

Рис. 5. Многоцветное скрытое изображение

(рисунки 7 и 8) стереограмм. Эти методы позволяют регистрировать и воспроизводить различные эффекты движения и объема, свойственные реальным объектам, в виде многоцветных и полноцветных голографических элементов. Такие элементы интуитивно понятны, но трудно воспроизводимы. Стереогаммы, являющиеся сами по себе защитным элементом, могут комбинироваться, с описанными выше элементами и эффектами.

Разработка новых защитных признаков и эффектов сопряжена с производством и обеспечением рынка изделиями, пользующимися спросом, а также прототипированием новых изделий на фотополимерной основе

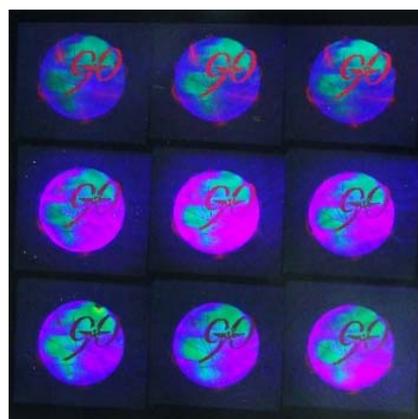


Рис. 6. Однопараллаксная многоцветная стереограмма

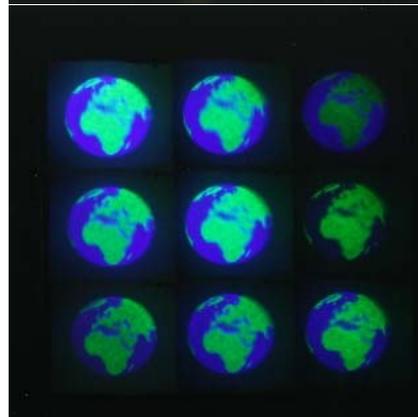
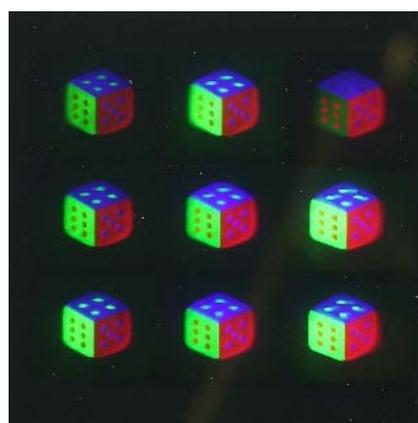


Рис. 7. Полнопараллаксная многоцветная стереограмма

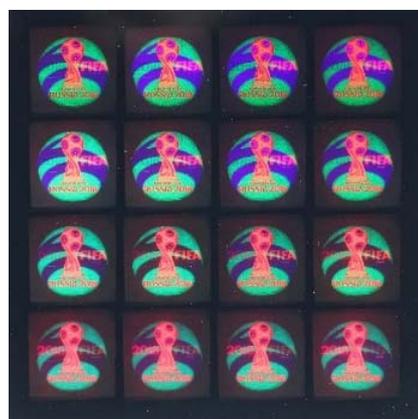


Рис. 8. Полнопараллаксная многоцветная стереограмма эффектом флип-флоп и микротекстом



Рис. 9. Голограмма «ДМС»



1 — микротекст 300 мкм «ВСК»; 2 — микротекст 100 мкм «ВСК»; 3 — боковые просечки; 4 — эффект объема логотипа «ВСК» с надписью «СТРАХОВАНИЕ» на грани цилиндра; 5 — «зеркальный» текст высокой четкости «ДМС», «ВСК»; 6 — динамическое муаровое фоновое изображение; 7 — изменения контраста изображения при остром угле наблюдения; 8 — разрушаемая при попытке переклеивания основа с УФ свечением

Рис. 10. Дизайн голограммы «ВСК»

с объемной голограммой, обладающими уникальными свойствами присущими этому типу голограмм.

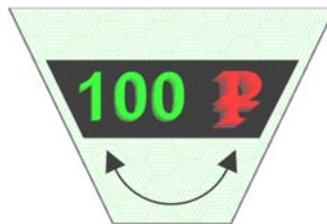
Серийно производимые изделия на сегодняшний день, например, — это самоклеящиеся этикетки для защиты бланков полисов добровольного медицинского страхования (рисунок 9).

Голограммы выполнены методом аналоговой записи с реального объекта и отличаются высокой селективностью и полными параллаксом восстановления изображения наличием ряда защитных элементов. Защитный комплекс продемонстрирован на примере этикетки «ВСК» (рисунок 10).

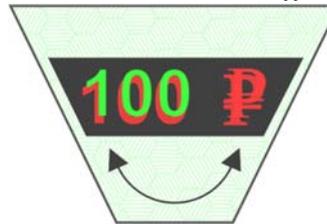
Около 40 голограмм с различным дизайном и подобным защитным комплексом выполнено в рамках программы обеспечения защиты полисов ДМС. Они имеют сертификат ФСТЭК и сертифицированы по 9 классу защищенности.

Прототипы других изделий также разрабатываются НПО «Криптен». Например, защитные нити с различными визуальными эффектами, показанными на рисунку 11.

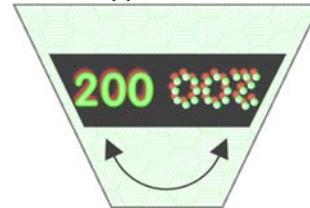
Другой пример прототипа изделия с объёмной защитной голограммой на фотополимерной основе это ламинат для защиты идентификационных документов.



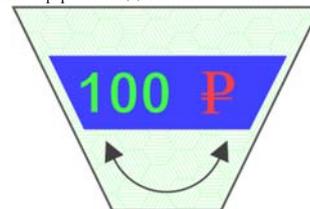
а) двуцветное изображение «100 P» с «плавающим» эффектом символа относительно цифр



б) двуцветно изображен «100 P» с «плавающим» эффектом и эффектом тени

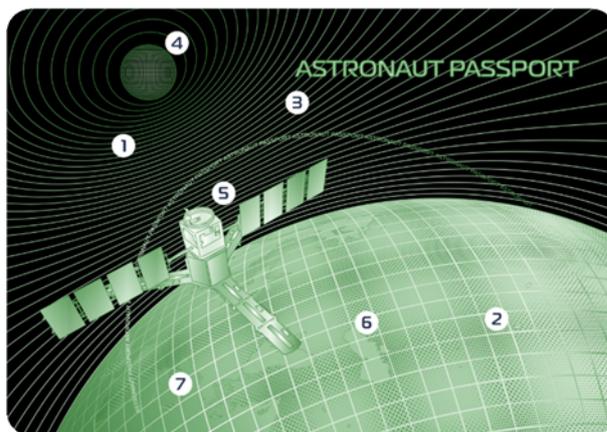


в) двуцветное изображение «200» с эффектом барельефа, динамическим эффектом движения блика и эффектом тени



г) трехцветное изображение со свитч-эффектом

Рис. 11. Визуальные эффекты фотополимерной нити



1 — гильоширный орнамент, выполненный в тонких линиях; 2 — динамические эффекты на растриванной поверхности планеты; 3 — эффект барельефа на основной надписи; 4 — динамический эффект расширения на растровой поверхности Луны; 5 — спутник высокого разрешения с различными динамическими эффектами; 6 — динамические контуры материков; 7 — изменение цвета изображения с зеленого на красный при повороте на 18°

Рис. 12. Голограмма на паспорт астронавта

Общемировая тенденция последнего времени — это использование фотополимерных голограмм в качестве средств визуальной защиты. Малая распростра-

ненность технологии производства, дороговизна оборудования и отсутствие в свободной продаже на рынке материалов для производства фотополимерных голограмм делает их устойчивыми к подделке. Простые и понятные визуальные эффекты с элементами движения и объема легко отличаемы от других видов защитных элементов и не имитируются средствами полиграфии.

НПО «Криптен» активно развивает направление фотополимерных голографических защитных элементов и имеет сертификаты, подтверждающие класс защищенности продукции, а также международные награды в области разработки объемных фотополимерных голографических элементов для защищенной полиграфии.

### **Recent advances in production of volume color protective holograms on thin-film photopolymer medium**

*A. V. Smirnov<sup>1</sup>, B. V. Akimov<sup>1</sup>, S. B. Odinkov<sup>2</sup>, D. S. Lushnikov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Research and Production Center "Krypten", Dubna, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

#### 1.4. Техника и принципы Фурье-спектроскопии в гиперспектральной голографии

С. Г. Каленков<sup>1</sup>, Г. С. Каленков<sup>2</sup>, А. Е. Штанько<sup>3</sup>

<sup>1</sup> НТЦ «Оптоэлектроника» Московского политехнического университета, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Микрохоло», Москва, Россия

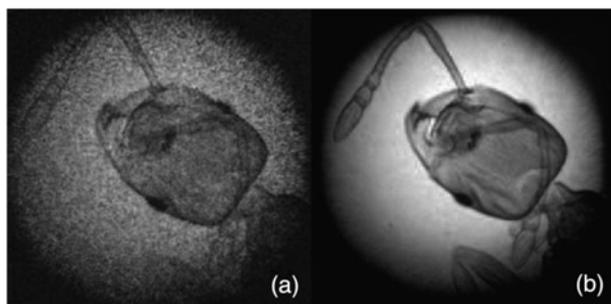
<sup>3</sup> Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

Предложено новое применение техники и принципов Фурье-спектроскопии — регистрация цифровых гиперспектральных голограмм микрообъектов в некогерентном свете. Настоящая работа обобщает и развивает наши предыдущие результаты по регистрации гиперспектральных Френелевских голограмм и голограмм сфокусированного изображения. Продемонстрирована возможность численного синтеза гиперспектрального (цветного) голографического изображения, а также существенного подавления спекл-шума и, соответственно, улучшения качества восстановленных изображений микрообъектов.

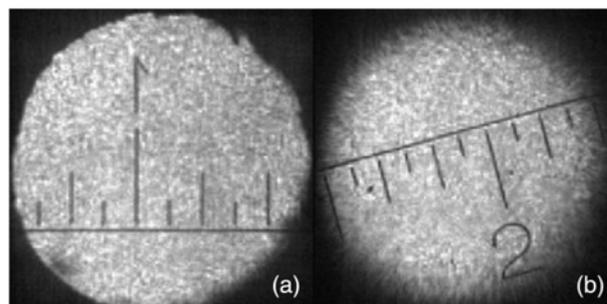
**Ключевые слова:** Голография, Фурье-спектроскопия, Микроскопия, Гиперспектральные изображения.

В серии наших работ мы впервые предложили и экспериментально подтвердили принципиально новый способ записи гиперспектральных голограмм в некогерентном (белом) свете [1–6]. В основе предложенного нами способа лежат принципы фурье-спектроскопии и соответствующая оптическая схема фурье-спектрометра (ФС). Как хорошо известно, ФС является наиболее совершенным оптическим прибором для точного измерения спектрального состава излучения, несущего информацию об оптических свойствах исследуемого образца или о химическом составе исследуемого материала. По сравнению с другими спектральными приборами ФС имеет беспрецедентно высокую разрешающую способность, т. е. он обеспечивает необычайно тонкое и точное описание спектральных характеристик исследуемого излучения. Как мы показали, принципиальная оптическая схема ФС может быть с успехом применена для регистрации гиперспектральных голограмм, если вместо точечного приемника для регистрации интерферограммы установить цифровую камеру, а на месте неподвижного зеркала — микрообъект. Как

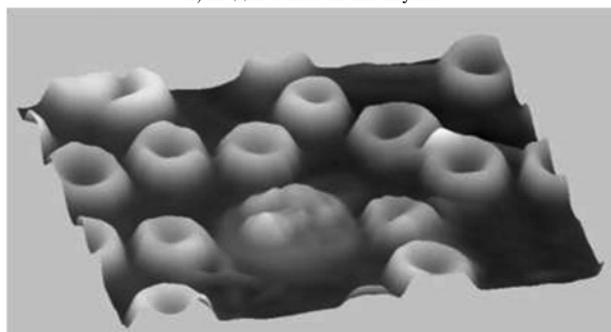
мы показали, Фурье-преобразование такой интерферограммы дает комплексную амплитуду дифракционного поля микрообъекта, что в свою очередь позволяет вычислить комплексную функцию пропускания (или отражения, в зависимости от оптических характеристик микрообъекта) на каждой спектральной частоте, т. е. гиперспектральную голограмму. В серии наших работ [7–9] мы экспериментально исследовали продольную и поперечную разрешающую способность метода. На примере штриховой миры мы показали, что его разрешающая способность соответствует дифракционному пределу. Экспериментально подтвердил возможность существенного подавления спекл-шума рисунка 1а. Для некоторых микрообъектов мы продемонстрировали возможность численного синтеза гиперспектрального (цветного) изображения. Мы так же исследовали возможность записи гиперспектральных голограмм сфокусированных изображений (рисунок 1в). На экспериментальном макете, в состав которого вошел микроскоп классического типа, были получены гиперспектральные изображения микрообъектов с предельным продольным и поперечным разрешением.



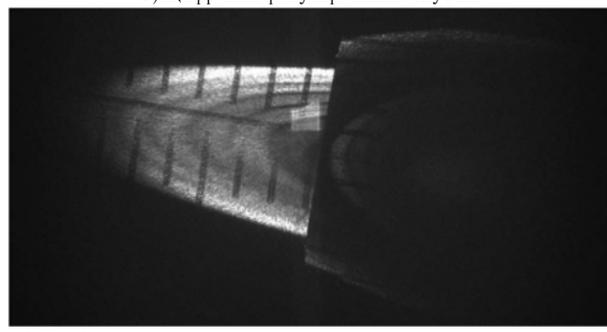
а) Подавление спекл-шума



б) Цифровая фокусировка по глубине



в) Фазовый профиль эритроцитов



г) Изображение головки микровинта, восстановленное по серии гиперспектральных голограмм Френеля

Рис. 1. Изображения объектов, полученных на макете гиперспектрального микроскопа

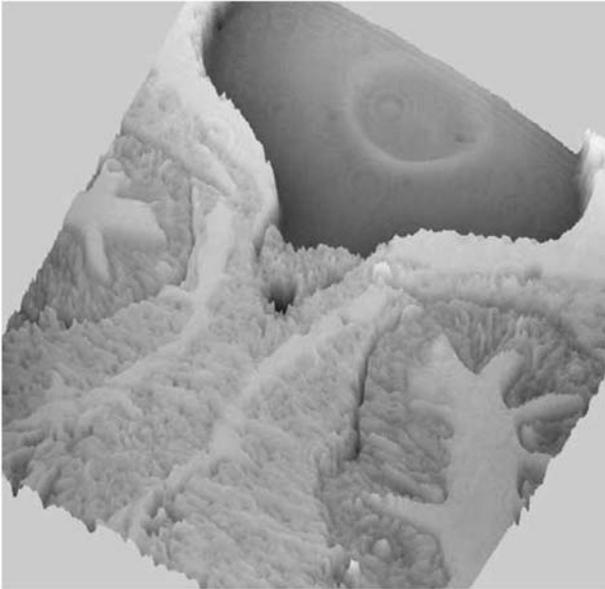


Рис. 2. Гиперспектральный фазовый профиль среза земляного червя в ИК-диапазоне (0,7–1 мкм)

В [7] нами была развита теория записи гиперспектральных Френелевских голограмм объектов в схеме на отражение (рисунок 1г).

Предложенный способ особенно перспективен в тех ситуациях (спектральных диапазонах), когда источники когерентного излучения либо отсутствуют, либо слишком дороги. Это относится, прежде к исследованию биологических объектов в терагерцовом и ИК-диапазонах электромагнитного излучения. Терагерцовый диапазон привлекает исследователей, прежде всего потому, что значительная часть информации биологических объектов, как то: клетки или длинные белковые молекулы содержится именно в этой части спектра [8, 9].

Следует особо подчеркнуть, что предложенный нами способ записи гиперспектральных голограмм выгодно отличается от чрезвычайно развитых методов оптической когерентной голографии — ОКТ [10], прежде всего тем, что позволяет получать амплитудно-фазовые гиперспектральные изображения объектов и что самое главное — изображения прозрачных (слабо поглощающих) объектов (рисунок 2). Важно отметить, что метод гиперспектральной Фурье-голографии позволяет в едином процессе регистрации зафиксировать амплитуду, фазу и частоту поля, что дает действительные основания называть его *holography*, то есть «полной записью».

#### Список источников

- [1] **Каленков, С. Г.** Фурье-спектрометр, как система голографического изображения микрообъектов в низкокогерентном свете // С. Г. Каленков, Г. С. Каленков, А. Е. Штанько // Измерительная техника. — 2012. — № 11. — С. 21–25.
- [2] **Каленков, С. Г.** Пространственно-спектральная цифровая голография микрообъектов в низкокогерентном свете / С. Г. Каленков, Г. С. Каленков, А. Е. Штанько // Радиотехника и электроника. — 2013. — № 12.
- [3] **Kalenkov, S. G.** Spectrally-spatial Fourier-holography / S. G. Kalenkov, G. S. Kalenkov, A. E. Shtanko // Optics Express. — 2013. — Vol. 21. — № 21. — P. 24985–24990.
- [4] **Kalenkov, G. S.** Hyperspectral Holographic Fourier-Microscopy / G. S. Kalenkov, S. G. Kalenkov, A. E. Shtanko // Imaging and Applied Optics. — 2014. — P. DTh3B.7.
- [5] **Kalenkov, S. G.** Hyperspectral digital holography of microobjects / Kalenkov S. G., Kalenkov G. S., Shtanko A. E. // Proceedings of SPIE: Practical Holography XXIX: Materials and Applications. — 2015. — Vol. 9386. — P. 938604.
- [6] **Каленков, Г. С.** Гиперспектральная голографическая фурье-микроскопия / Г. С. Каленков, С. Г. Каленков, А. Е. Штанько // Квантовая электроника. — Том 45. — № 4. — С 333–338.
- [7] **Kalenkov, S. G.** Hyperspectral holography: an alternative application of the Fourier transform spectrometer / S. G. Kalenkov, G. S. Kalenkov, A. E. Shtanko // JOSA B. — 2017. — Vol. 34. — № 5. — P. B49–B55.
- [8] **Федоров, В. И.** Исследование биологических эффектов электромагнитного излучения субмиллиметровой части терагерцового диапазона / В. И. Федоров // Биомедицинская радиоэлектроника. — 2011. — № 2. — С. 17–27.
- [9] **Globus, T. R.** THz-Spectroscopy of Biological Molecules / T. R. Globus, D. L. Woolard, T. Khromova, T.W. Crowe, M. Vykhovskaia, B. L. Gelmont, J. Hesler, A. C. Samuels // Journal of Biological Physics. — 2003. — Vol 29. — № 2. — P. 89–100.
- [10] **Kim, M.** Principles and techniques of digital holographic microscopy // SPIE Rev. — 2010. — Vol 1. — P. 018005.

## FTS techniques applied in hyperspectral holography

*S. G. Kalenkov<sup>1</sup>, G. S. Kalenkov<sup>2</sup>, A. E. Shtanko<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Scientific and technical center “Optoelectronics” at Moscow Technical University “Stankin”, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Microholo Ltd., Moscow, Russia

<sup>3</sup> Moscow Technical University “Stankin”, Moscow, Russia

An alternative application of the Fourier transform spectroscopy (FTS) principles and techniques is proposed. Registration of hyperspectral holograms in incoherent light by using FTS is suggested. This work generalizes and develops our previous results on registration of hyperspectral Fresnel’s and image plane holograms. Theoretical and experimental results are provided and discussed. The proposed method is applied to the problems of digital holographic microscopy, including speckle noise reduction, hyperspectral imaging, and coloring and optical profiling. A major advantage of the proposed method is that it allows simultaneous recovery of the amplitude, the phase, and the spectral frequency of the wave field in a single registration process.

**Keywords:** Digital holography; Spectral holography; Spectroscopy, Fourier transforms.

### 1.5. Аппаратура ВНИИОФИ для интерференционных измерений

*Г. Н. Вшняков, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев*

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия

Начиная с 70-х годов прошлого столетия во ВНИИОФИ начались работы по цифровой обработке данных интерференционных и голографических измерений. В 1995 году была организована лаборатория Голографии и оптической томографии, которую возглавил д. т. н., профессор Г. Г. Левин. Под его руководством был создан параметрический ряд автоматизированных интерференционных приборов для измерения микроструктуры и формы поверхности объектов различного размера.

Для автоматизации процесса расшифровки интерферограмм было разработано собственное программное обеспечение WinPhast [1], которое используется в составе всех этих приборов. Это программное обеспечение (ПО) реализует метод фазовых шагов, суть которого заключается в том, что необходимо зарегистрировать несколько интерферограмм, отличающихся фазой опорного пучка [2].

Разработанные во ВНИИОФИ приборы для интерференционных измерений можно разделить на два класса по размеру исследуемых объектов — это интерференционные микроскопы для измерения микрообъектов или малых участков больших объектов и интерферометры для измерения макрообъектов.

#### Интерференционные микроскопы

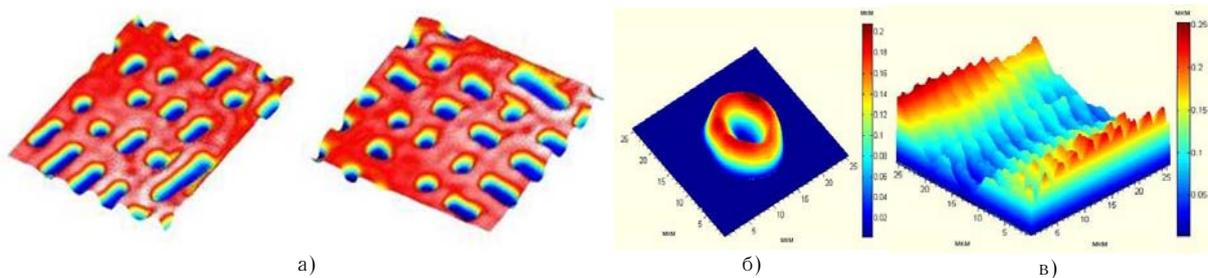
Интерференционные микроскопы предназначены, в первую очередь, для измерения параметров шероховатости и микроструктуры отражающих поверхностей, а во вторую — для измерения 2D и 3D пространственного распределения показателя преломления прозрачных микрообъектов, например, живых биологических клеток, оптических волокон, микролинзовых растров и т. п.

Первый автоматизированный микроинтерферометр МИА-1М был создан на базе серийного микроскопа Линника МИИ-4М, который выпускается АО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург. Для реализации метода дискретного фазового сдвига штатный узел крепления и юстировки опорного зеркала заменен на новую единицу с пьезозеркалом. Для увеличения длины когерентности и достижения возможности исследования

прозрачных фазовых объектов штатный осветитель был заменен на лазерный осветитель, излучение которого пропускать через вращающийся диффузор для устранения спекл-шума.

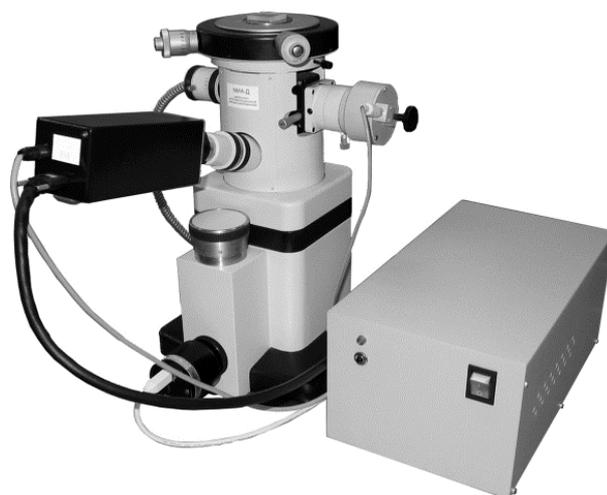
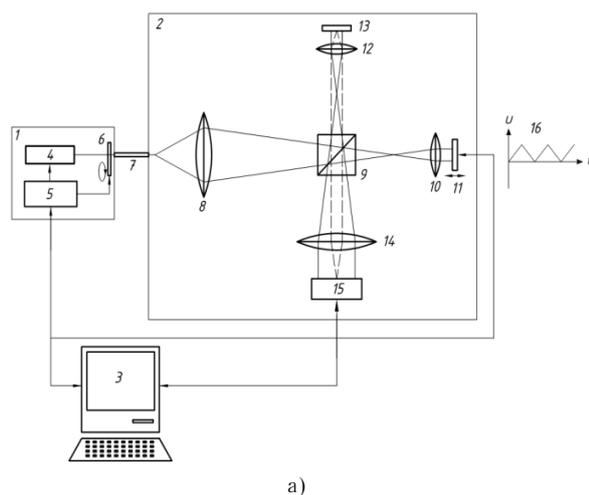
Интерференционные картины при различных положениях пьезозеркала регистрируются с помощью встроенной цифровой ПЗС-камеры, оцифровываются и передаются в персональный компьютер, где производится их автоматическая обработка. В результате восстанавливается оптическая разность хода, соответствующая измеряемому профилю поверхности (для отражающих объектов) или деформации волнового фронта (для пропускающих объектов). Результаты измерений в виде графиков сечений, псевдоцветовых, аксонометрических изображений, текстовой информации отображаются на экране компьютера. Для расширения диапазона измеряемых высот в микроскопе реализован двухволновый метод, когда объект измеряется на двух близких длинах волн. Микроскоп МИА-1М внесен в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений (ранее Государственный реестр средств измерений) под № 48171-П. Примеры изображений, восстановленных из интерферограмм, полученных на приборе МИА-1М, приведены на рисунке 1. На данном приборе была достигнута высокая чувствительность (до  $2 \text{ \AA}$ ) при измерении высоты профиля отражающей поверхности на примере подложек лазерных зеркал [3, 4]. Другие технические характеристики МИА-1М можно найти на сайте ВНИИОФИ [12].

Неинвазивность оптических измерений позволяет применять интерференционные микроскопы в биологических исследованиях для изучения живых клеток, являющихся нестационарными (динамическими) фазовыми объектами. Получаемое на микроскопе пространственное распределение разности хода (фазовое изображение) и его изменение во времени несет информацию о структуре и динамических процессах в клетке [5]. Сложность исследования динамических фазовых объектов заключается в том, что для реализации метода фазовых шагов необходимо зарегистрировать



а — топограмма поверхности участка CD-диска, б — фазовое изображение эритроцита, в — фазовое изображение мышечного волокна

Рис. 1. Примеры изображений, полученных на МИА-1М



1 — осветительный блок; 2 — интерференционный микроскоп Линника; 3 — ПЭВМ; 4 — лазер; 5 — схема управления; 6 — диффузор; 7 — световод; 8, 14 — объективы; 9 — светоделитель; 10, 12 — микрообъективы; 11 — опорное зеркало на пьезоэlemente; 13 — предметное зеркало; 15 — двумерный фотоприемник (высокоскоростная камера); 16 — вид сигнала, подаваемого на пьезоэлемент опорного зеркала  
Рис. 2. Структурная схема (а) и фотография (б) динамического интерференционного микроскопа МИА-Д

несколько интерференционных изображений в течение короткого промежутка времени. Для обеспечения высокой точности фазовых изображений необходимо захватывать не менее 10 интерферограмм, поэтому для скорости реконструкции 30 фазовых изображений в секунду, частота захвата интерференционных изображений должна составлять не менее 300 кадров в секунду.

Для динамического режима работы необходимо непрерывное смещение опорного зеркала, которое реализовано в микроскопе МИА-Д, созданном также на основе микроинтерферометра Линника МИИ-4М. Структурная схема и фотография динамического микроинтерферометра МИА-Д представлены на рисунке 2 [6].

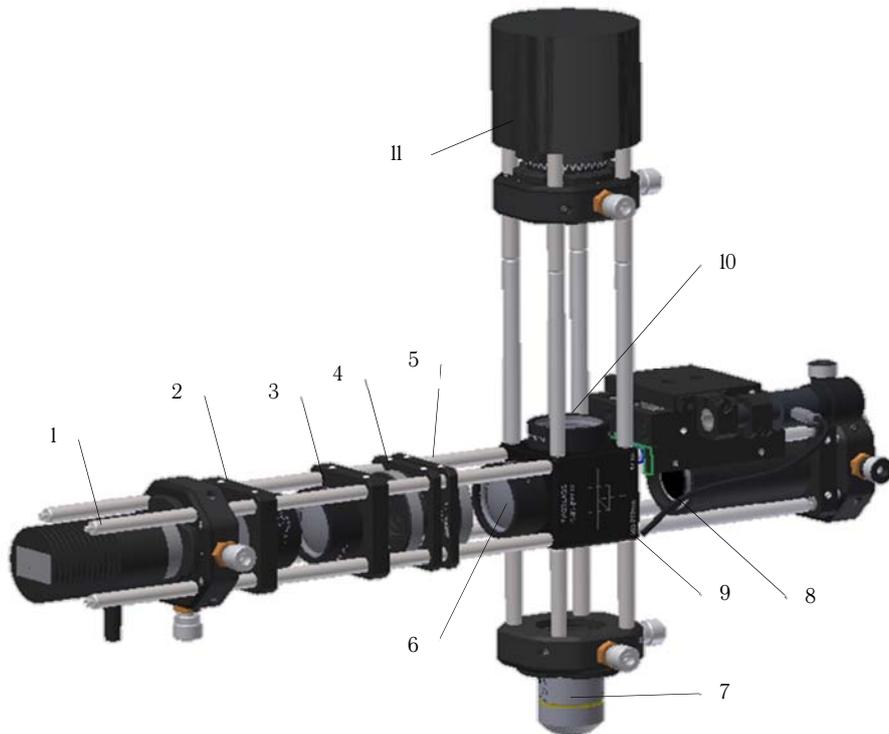
В своем составе он содержит интерференционный микроскоп 2, фотоприемник с большой частотой захвата изображений (высокоскоростную камеру) 15 и фазосдвигающее устройство на основе пьезоактюатора 11, позволяющее осуществлять непрерывный сдвиг зеркала опорного канала. В состав прибора также входит осветительный блок 1, включающий в себя источник монохроматического света — лазер 4, вращающийся диффузор 6 и схему управления 5. В интерферометр оптическое излучение поступает по световоду 7. Объект исследования располагается на предметном зеркале 13. Управление работой устройства осуществляется с помощью компьютера 3.

Для записи изображений была использована скоростная камера FastVideo 300 (ООО «НПО Астек», г. Москва). Она имеет КМОП матрицу размером  $600 \times 800$  и позволяет записывать кадры с частотой 300 Гц. Захват изображений и сдвиг пьезоактюатора осуществлялись независимо. Для управления работой прибора было модернизировано штатное ПО скоростной камеры FastVideoLab, а также разработано специальное ПО WinPhast-D, предназначенное для управ-

ления захватом изображений с помощью видеокамеры, обработки записанных интерферограмм и визуализации результатов. Фазовый сдвиг между интерферограммами определяется по разности аргументов комплексного числа в центре  $+1$ -го или  $-1$ -го порядка фурье-спектра интерферограммы. Этот метод накладывает ограничения на количество полос на интерферограмме, которое должно было быть достаточным, для того, чтобы разделились  $+1$  и  $-1$  порядки в фурье-плоскости. Далее полученные сдвиги используются для реконструкции фазового распределения.

Технические характеристики МИА-Д можно найти на сайте ВНИИОФИ [13]. Микроскоп прошел испытания с целью утверждения типа и внесен в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений под номером 48172-11.

Описанные выше интерференционные микроскопы были основаны на коммерческом микроскопе МИИ-4. Первоначально этот микроскоп был предназначен для измерения параметров шероховатости отражающих изделий, которые укладывались на предметный столик исследуемой поверхностью вниз. Это не всегда удобно, особенно для прецизионных оптических деталей, например, подложек лазерных зеркал. Еще один недостаток конструкции МИИ-4 заключается в том, что фокусировка на поверхность изделия осуществляется перемещением микрометрическим винтом всего оптико-механического блока интерферометра относительно неподвижного предметного столика, расположенного на корпусе микроинтерферометра. Это приводит к тому, что под тяжестью блока интерферометра происходит его медленное смещение вдоль оптической оси относительно предметного столика, что ведет к расфокусировке изображения исследуемой поверхности. Следовательно, длительные измерения на этом микроскопе проводить нельзя. Невоз-



1 — светодиодный осветитель; 2 — коллиматорная линза; 3 — коллекторная линза; 4 — апертурная диафрагма; 5 — полевая диафрагма; 6 — конденсорная линза; 7, 8 — микрообъективы; 9 — светоделительный кубик; 10 — проекционный объектив; 11 — видеокамера  
Рис. 3. Структурная схема интерференционного микроскопа МИА-2

возможность смены микрообъективов для получения различного увеличения также является недостатком МИИ-4.

Поэтому нами был разработан новый интерференционный микроскоп МИА-2, в котором устранены перечисленные выше недостатки. На рисунке 3 представлена структурная схема интерференционного микроскопа. Микроскоп также построен по схеме Линника, но по отношению к МИИ-4 оптическая схема МИА-2 является инвертированной, т. е. объект укладывается на предметный столик исследуемой поверхностью вверх, как в обычном микроскопе. Фокусировка осуществляется перемещением трехкоординатного предметного столика с объектом в вертикальном

направлении. Интерферометр собран на вертикальной плите и его элементы крепятся к плите с помощью кронштейнов. В результате оптическая ось микроскопа расположена всего в 35 мм от плиты, что задает жесткость его конструкции и хорошую защиту от вибраций. Все элементы микроскопа закреплены с помощью 30 мм кейдж-системы (от англ. cage — «каркас») фирмы Thorlabs, что позволяет легко центрировать и юстировать эти элементы друг относительно друга.

В качестве источника излучения в МИА-2 используется светодиодный осветитель 1. Изображение светящейся площадки светодиода строится при помощи двух ахроматических линз 2, 3 в плоскости ири-

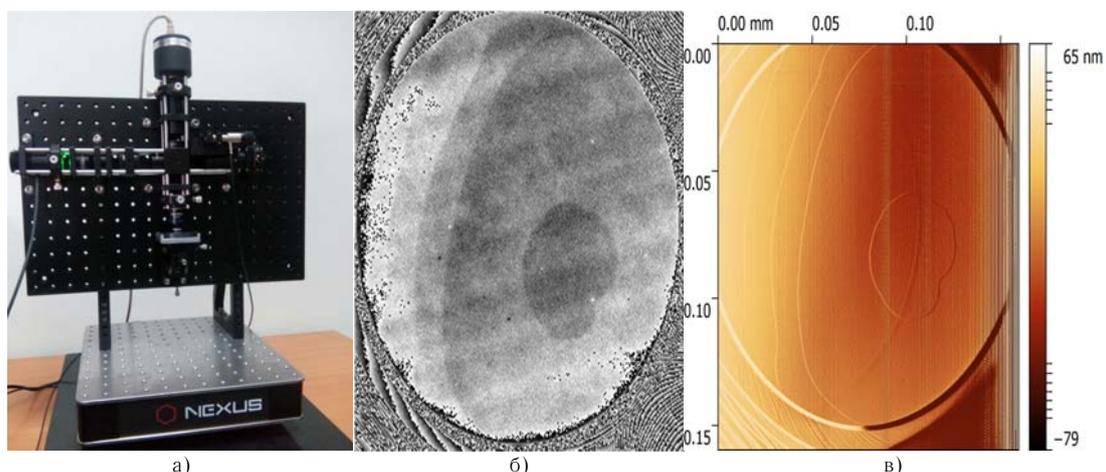
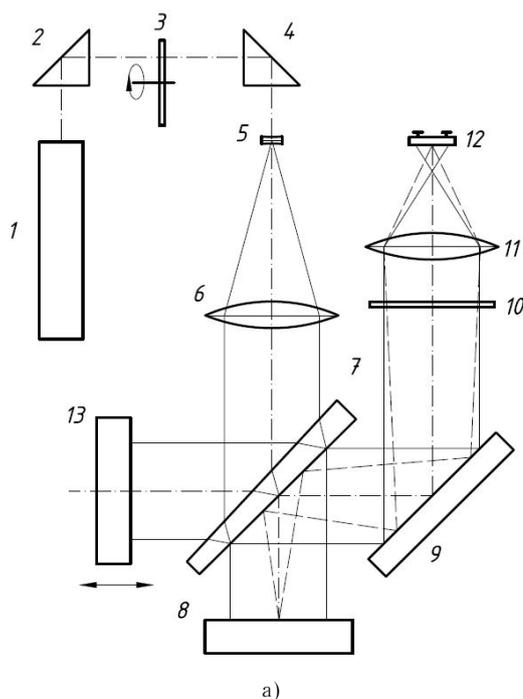


Рис. 4. Фотография МИА-2 (а), топограмма моноатомных слоев кремния, полученная на МИА-2 (б), и топограмма моноатомных слоев кремния, полученная на атомно-силовом микроскопе (в)



а) б)  
1 — He-Ne лазер; 2, 4 — поворотные призмы; 3 — вращающийся диффузор; 5, 6 — линзы коллиматора; 7 — светоделительный клин; 8 — измеряемый объект; 9 — опорное зеркало; 10 — светофильтр; 11 — объектив; 12 — ПЗС-камера, 13 — зеркало с пьезопреобразователем  
Рис. 5. Оптическая схема (а) и фотография (б) интерферометра ПИК-30М

совой диафрагмы 4, играющей роль апертурной диафрагмы. Рядом с ней расположена такая же полевая диафрагма 5. Изображение апертурной диафрагмы при помощи линзы 6 строится в задней фокальной плоскости микрообъективов: предметного 7 и опорного 8. Деление света на два пучка осуществляется с помощью светоделительного кубика 9. Используемые микрообъективы должны быть идентичны по всем параметрам (увеличению, числовой апертуры), но конструкция микроскопа позволяет их попарную смену, например, на микрообъективы с другим увеличением.

Пучок света отражается от предмета и опорного зеркала и, пройдя через светоделитель и проекционный объектив 10, попадает на видеокамеру «Видеоскан 285 USB» 11, которая регистрирует интерференционную картину. Для реализации метода фазовых шагов в опорном канале используется горизонтальный предметный столик, на котором закреплена сборка микрообъектив-зеркало. Опорное зеркало представляет собой супергладкую кремниевую пластинку, шероховатость которой составляет  $0,5 \text{ \AA}$ , изготовленную по патентованной технологии Института Физики Полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН [7, 8].

Экспериментальные исследования на МИА-2 подтвердили его высокую чувствительность к изменениям высоты микрорельефа. На рисунке 4б, в приведены топограммы поверхности из моноатомных слоев кремния, изготовленной по указанной выше технологии, измеренные на МИА-2 и атомно-силовом микроскопе. Размер поля зрения  $150 \times 150 \text{ мкм}$ , высота моноатомного слоя  $3,14 \text{ \AA}$ .

### Интерферометры

Интерферометр ПИК-30М предназначен для измерения относительных высот профиля поверхности (топограмм) полированных изделий, в том числе подложек сферических зеркал, диаметр которых не превышает 30 мм, высота не превышает 10 мм, а радиус кривизны лежит в диапазоне от 2 до 7 м. Благодаря сменному опорному зеркалу в интерферометре ПИК-30М можно измерять полированные изделия без зеркального покрытия, коэффициент отражения которых не менее 4 %. Все элементы интерферометра закреплены с помощью кейдж-системы фирмы Thorlabs на вертикальной плите, установленной на сотовом столе. Конструкция интерферометра ПИК-30М позволяет также измерять по участкам размером до 30 мм поверхность крупногабаритных деталей до 150 мм.

Интерферометр обладает:

- 1) высокой точностью измерения (более  $\lambda/3000$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения) параметров оптических элементов диаметром до 30 мм,
- 2) автоматизацией процесса проведения измерений,
- 3) низкой чувствительностью к вибрациям,
- 4) простотой и легкостью в эксплуатации,
- 5) малыми габаритами.

Оптическая схема и фотография интерферометра ПИК-30М представлены на рисунке 5. В основе прибора лежит оптическая схема интерферометра Тваймана — Грина. Отличительной особенностью оптической схемы по сравнению с первоначальной версией

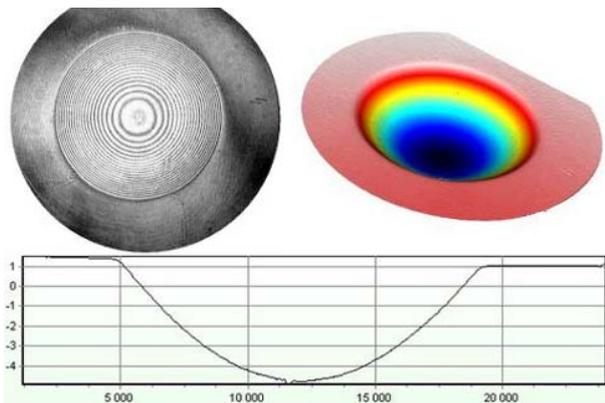


Рис. 6. Результат измерения топограммы подложки лазерного зеркала

прибора [9] является вращающийся диффузор 3, который используется для уменьшения когерентных шумов и повышения качества интерферограмм. Диффузор установлен на расстоянии 6 см от линзы 5 коллиматора. Благодаря малому диаметру входного отверстия линзы 5 (около 4 мм) пространственная когерентность излучения сохраняется.

Прибор состоит из двух частей: интерферометра и блока управления и обработки информации. Компьютерная расшифровка интерферограмм производится по методу дискретного фазового сдвига, вносимого плоским зеркалом 13, сдвигаемым пьезоэлементом. В результате обработки интерферограмм восстанавливается двумерная карта высот профиля поверхности объекта (топограммы) относительно начальной точки, выбираемой оператором. Программное обеспечение по полученным топограммам позволяет вычислять радиус кривизны сферических поверхностей, среднее квадратическое отклонение и предельное отклонение измеренной топограммы от плоской и сферической поверхности, «децентрировку» сферической поверхности относительно геометрического центра подложки сферического зеркала в диапазоне от 0,1 до 5,0 мм.

Пример измеренного профиля поверхности подложки сферического лазерного зеркала приведен на рисунке 6. Подробные технические характеристики прибора можно узнать на сайте

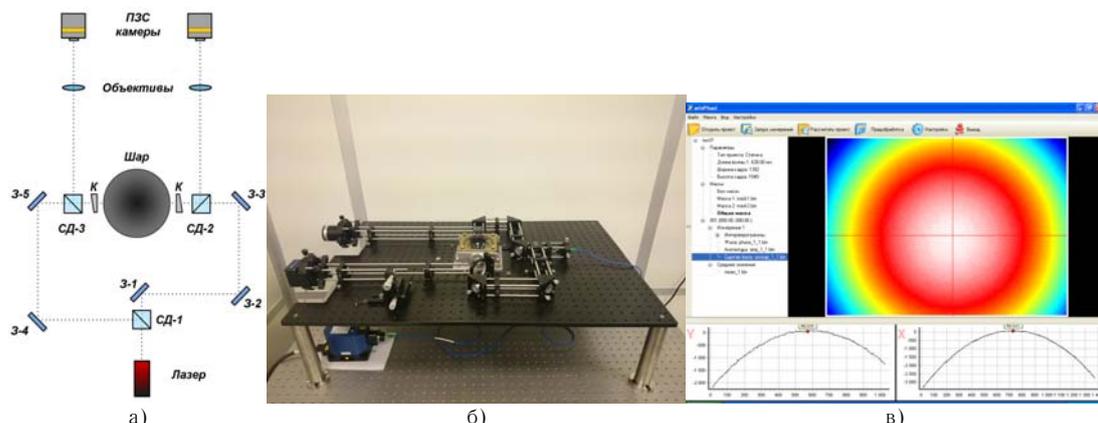
[www.vniiofi.ru/depart/m44/pik-30.html](http://www.vniiofi.ru/depart/m44/pik-30.html). Интерферометр внесен в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений под номером 48169-П.

Для исследования крупногабаритных оптических деталей или волновых фронтов часто используют схему интерферометра Физо, например, в широко известных интерферометрах фирмы Zygo, а также отечественной фирмы ЗАО «Дифракция» [10]. Во ВНИИОФИ также создан программно-аппаратный комплекс ИФА-300, предназначенный для автоматизации измерений на интерферометрах, построенных по схеме Физо, который может применяться для измерений отклонений от сферичности и плоскостности прецизионных поверхностей оптических деталей и оптических систем. Комплекс состоит из источника излучения, блока управления и ПО. Источником излучения служит диодный лазер с внешним резонатором и коллимирующий объектив.

В ИФА-300 для автоматической расшифровки интерферограмм реализован метод фазовых шагов. Сдвиг полос осуществляется не за счет механического сдвига опорного элемента, а путем изменения длины волны излучения [2, П], т. к. трудно выполнить прямолинейное движение крупногабаритных оптических элементов интерферометра без перекосов. В качестве источника перестраиваемого по длине волны высококогерентного излучения в видимой области оптического спектра может использоваться отечественный диодный лазер с внешним резонатором модели ECDL-6415R фирмы VitaWave или перестраиваемый диодный лазер Vortex Plus TLB-6804-P, фирмы New Focus, входящей в корпорацию Newport, США.

Комплекс ИФА-300 с лазером ECDL-6415R был использован для автоматизации работы интерферометра Физо в составе Государственного первичного специального эталона единицы длины отклонений от плоскостности оптических поверхностей размером до 200 мм ГЭТ 183-2010 [11].

Экспериментальный образец комплекса с лазером Vortex Plus TLB-6804-P был использован в составе интерферометра Саундерса, предназначенного для бесконтактных измерений диаметра и объема кремниевго шара по программе «Авогадро». Оптиче-



СД1–3 — светоделительные кубики; З1–5 — поворотные зеркала; К — оптические клинья с эталонной плоской поверхностью  
Рис. 7. Оптическая схема (а), фотография интерферометра Саундерса (б) и топограмма поверхности шара(в)

ская схема и фотография макета интерферометра приведены на рисунке 7. Исследуемый объект в форме шара помещается внутрь интерферометра Фабри-Перо, образованного плоскими эталонными поверхностями оптических клиньев К. В результате возникают два неравноплечных интерферометра Физо, образованных эталонными зеркалами основного интерферометра Фабри-Перо и поверхностью шара.

Две системы интерференционных полос (колец Ньютона) образуются световыми пучками, отраженными от поверхности шара и ближайшей эталонной плоскости. Для анализа интерференционных полос и

реконструкции формы поверхности шара в лазерном интерферометре применяется метод фазовых шагов путем изменения длины волны лазерного излучения. Для достижения фазового шага в  $2\pi$  радиан (смещение на одну интерференционную полосу) требуется сдвиг частоты излучения на величину 5 ГГц для интерферометра Фабри-Перо с базовым расстоянием 30 мм. Такой сдвиг частоты приводит к изменению длины волны излучения всего на 0,007 нм, что никак не сказывается на погрешности измерения диаметра шара. Топограмма поверхности шара приведена на рисунке 7в.

### Список литературы

- [1] **Корженевич, Е. Л.** Расшифровка электронных спекл-интерферограмм в условиях сильных шумов / Е. Л. Корженевич, Г. Г. Левин // Оптика и спектроскопия. — 1996. — Том 81. — № 1. — С. 149–152.
- [2] **Malacara, D.** Optical Shop Testing / 2nd Edition, Wiley-VCH. — 1992. — P. 792.
- [3] **Вишняков, Г.Н.** Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине. Численное моделирование / Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев, И. Ю. Цельмина // Оптика и спектроскопия. — 2013. — Том 115. — № 6. — С. 1039–1046.
- [4] **Вишняков, Г. Н.** Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине. Экспериментальные результаты / Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев, И. Ю. Цельмина // Оптика и спектроскопия. — 2014. — Том 116. — № 1. — С. 170–175.
- [5] **Тычинский, В. П.** Когерентная фазовая микроскопия внутриклеточных процессов / В. П. Тычинский // Успехи физических наук. — 2001. — Том 171. — № 6. — С. 649–662.
- [6] **Левин, Г. Г.** Автоматизированный интерференционный микроскоп для измерения динамических объектов / Вишняков Г.Н., Минаев В.Л. / Г. Г. Левин / Приборы и техника эксперимента. — 2014. — № 1. — С. 79–84.
- [7] **Щеглов, Д. В.** Высокоточные меры линейных размеров в нанодиапазоне / Д. В. Щеглов, С. С. Косолобов, Л. И. Федина, Е. Е. Родякина, А. К. Гутаковский, С. В. Ситников, А. С. Кожухов, С. А. Загарских, В. В. Копытов, В. И. Евграфов, Г. В. Шувалов, В. Ф. Матвейчук, А. В. Латышев // Российские нанотехнологии. — 2013. — Том 8. — № 7–8. — С. 84–94.
- [8] **Патент № 2 371 674 РФ.** Способ изготовления ступенчатого высотного калибровочного стандарта для профилометрии и сканирующей зондовой микроскопии / Д. В. Щеглов, С. С. Косолобов, Е. Е. Родякина, А. В. Латышев. — Оpubл. 27.10.2009.
- [9] **Вишняков, Г. Н.** Автоматизированный интерферометр для контроля плоских и сферических полированных поверхностей / Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев, И. Ю. Цельмина // Оптический журнал. — 2013. — № 5. — С. 76–82.
- [10] **Полещук, А. Г.** Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей / Г. Н. Вишняков, В. Н. Хомутов, А. Е. Маточкин, Р. К. Насыров, В. В. Черкашин // Фотоника. — 2016. — № 4. — С. 38–50.
- [11] **Новиков, Д. А.** Измерительно-калибровочная установка на базе большепольной интерферометрии Физо / Г. Н. Вишняков, С. Ю. Золотаревский // Метрология. — 2012. — № 12. — С. 17–24.
- [12] ФГУП ВНИИОФИ: Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений — Микропрофилометр / URL: <http://www.vniiofi.ru/depart/m44/microfil.html>.
- [13] ФГУП ВНИИОФИ: Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений — Микроскоп интерференционный автоматизированный (динамический) МИА-Д / URL: <http://www.vniiofi.ru/depart/m44/mia-d.html>.
- [14] ФГУП ВНИИОФИ: Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений — ПИК-30 / URL: <http://www.vniiofi.ru/depart/m44/pik-30.html>.

## VNIIOFI equipments for interference measurements

*G. N. Vishnyakov, G. G. Levin, V. L. Minaev*

FSUE "Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements", Moscow, Russia

Since the 1970s, VNIIOFI started digital data processing of interference and holographic measurements. In 1995 the laboratory of "Holography and Optical Tomography" was organized, headed by Doctor of Technical Sciences, Professor G. G. Levin. Under his leadership, a parametric series of automated interference devices was created to measure the microstructure and surface shapes of objects of various sizes. To automate the process of decoding the interferograms, WinPhast's own software was developed, which is used in all these devices. This software implements the method of phase shifting interferometry, the essence of which is that it is necessary to record several interferograms with different phase of the reference beam. The instruments designed for interferometric measurements developed at VNIIOFI can be divided into two classes according to the size of the objects under investigation: interference microscopes for measuring microobjects or small sections of large objects and interferometers for measuring macroobjects. Interference microscopes (MIA-IM, MIA-D, MIA-2). They are primarily intended for measuring roughness parameters and microstructure of reflecting surfaces, and secondly for measuring 2D and 3D spatial distribution of the refractive index of transparent microobjects, for example, living biological cells, optical fibers, microlens array. Interferometers (PIK-30M, IFA-300). They are designed to measure the shape of the surface of optical surfaces or the shape of the wave front. Technical characteristics of microscopes and interferometers can be found at [www.vniiofi.ru/depart/m44](http://www.vniiofi.ru/depart/m44).

## 1.6. Поляризационная динамическая голография

А. Л. Толстик

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Проанализированы схемы поляризационной записи динамических голограмм, формируемых при ортогональных поляризациях сигнальной и опорной волн. Рассмотрены варианты ортогональных линейных и ортогональных круговых поляризаций записывающих голограмму волн. Особое внимание уделено сингулярным поляризационным голограммам, формируемым ортогонально поляризованными гауссовыми и сингулярными световыми пучками. Продемонстрирована возможность управления поляризацией сингулярной волны за счет изменения поляризации волн, участвующих во взаимодействии.

**Ключевые слова:** Голография, Поляризационная запись, Сингулярные пучки.

Классическая схема записи голограмм предполагает использование одинаково поляризованных волн, когда в светочувствительной среде формируются динамические решетки за счет пространственной модуляции интенсивности интерференционного поля. При поляризационной голографической записи опорная и сигнальная волны поляризованы ортогонально. В этом случае суммарная интенсивность остается постоянной и имеет место только пространственная модуляция состояния поляризации света в соответствии с разностью фаз записывающих голограмму волн [1]. Однако и в этих условиях в резонансных средах возможно формирование динамических решеток вследствие светоиндуцированной анизотропии поглощения, а также зависимости интенсивности насыщения поглощения от состояния поляризации лазерного излучения [2, 3].

В настоящей работе приведен обзор результатов по поляризационной записи динамических голограмм, включая запись голограмм гауссовыми и сингулярными световыми пучками. Рассмотрены механизмы записи поляризационных голограмм как за счет эффекта светоиндуцированной анизотропии поглощения, так и за счет зависимости интенсивности насыщения поглощения раствора красителя от состояния поляризации лазерного излучения, периодически меняющейся от линейной до круговой. Проанализированы состояния поляризации дифрагированной волны в зависимости от комбинации состояний поляризации всех волн, участвующих в записи и считывании динамических голограмм.

В качестве нелинейной среды для записи сингулярных поляризационных динамических голограмм использовался этанольный раствор красителя родамин-6Ж [4]. Запись и считывание динамической голограммы проводились на частоте второй гармоники Nd:YAG лазера, попадающей в максимум полосы поглощения раствора красителя. Результаты экспериментального исследования поляризационных сингулярных голограмм представлены на рисунке 1, где приведены изображения пучков, полученные в эксперименте (левая колонка), и соответствующие им интерферограммы (правая колонка), подтверждающие наличие топологического заряда. Пространственные профили интенсивности световых пучков регистрировались с помощью CCD-камеры. Для определения топологического заряда использовался интерферометр Маха — Цен-

дера, позволяющий осуществить интерференцию светового пучка с зеркально симметричным. При такой схеме регистрации количество разветвлений на интерференционной картине соответствует удвоенному топологическому заряду. Для изменения состояния поляризации волн в схему вносили фазовые пластинки  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$ . Состояние поляризации дифрагированной волны анализировалось с помощью призмы Глана.

На начальном этапе все волны имели одинаковую линейную поляризацию, что соответствовало стандартной схеме записи и считывания динамических голограмм. Изображения на рисунке 1, *a, a'* соответствуют сигнальному пучку  $E_S$  с топологическим зарядом  $l_S = 1$ , что подтверждается интерферограммой, на которой в точке разветвления добавляются две интерференционные полосы, отвечающие интерференции светового пучка с зеркально симметричным. Остальные изображения на рисунке 1 соответствуют пространственному распределению интенсивности дифрагированной волны  $E_D$ , полученной при одинаковых поляризациях взаимодействующих волн (*b*) и при ортогональной поляризации опорной  $E_1$  (*c*), сигнальной  $E_S$  (*d*), и считывающей  $E_2$  (*e*) волн. Соответствующие интерферограммы (рисунк 1, *b' — e'*) показывают, что при любой комбинации поляризаций взаимодействующих волн топологический заряд, внесенный в сформированную динамическую голограмму, передается дифрагированной волне и по модулю равен заряду сигнальной волны  $E_S$ . Такая ситуация хорошо объясняется с использованием формализма нелинейной оптики для записи и считывания динамических голограмм. Как известно в этом случае дифрагированная волна определяется нелинейной поляризуемостью  $P_{\text{нел}} = \chi^{(3)} E_1 E_2 E_S^*$  [5] и топологический заряд любой из взаимодействующих волн передается дифрагированной волне.

Экспериментально измеренная зависимость поляризации дифрагированной волны  $E_D$  при поляризационной голографической записи приведена в таблице 1. Видно, что при реализации взаимодействия на решетках, записанных одинаково поляризованными волнами, (таблица 1, 1-й и 2-й столбцы)

поляризация дифрагированной волны определяется поляризацией считывающей волны. Иная ситуация имеет место при реализации дифракции на поляризационных динамических решетках, формируемых

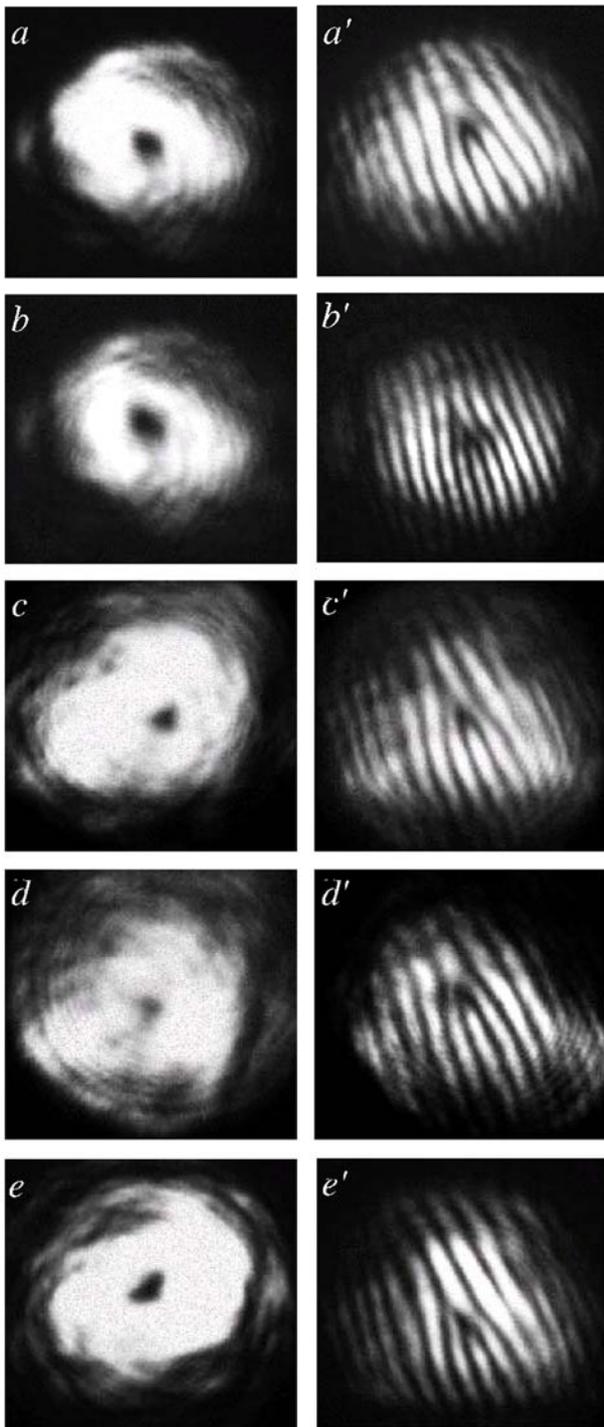


Рис. 1. Пространственные распределения интенсивности сигнального (*a*) и дифрагированных (*b–e*) пучков и соответствующие интерферограммы

ортогонально поляризованными волнами. В результате такой интерференции в среде имеет место модуляция состояния поляризации интерференционного поля, которое при равных интенсивностях записывающих голограмму волн периодически меняется от линейной до круговой. В этом случае наряду с эффектом светоиндуцированной анизотропии поглощения проявляется зависимость интенсивности насыщения поглощения растора красителя от состояния поляризации.

При дифракции на поляризационных решетках поляризация дифрагированной волны ортогональна поляризации считывающей волны (таблица 1, 3-й и 4-й столбцы). При этом использование сингулярного пучка, имеющего винтовую фазовую дислокацию, не привело к каким-либо изменениям по сравнению со случаем использования только гауссовых световых пучков [2] и подтвердило независимость особенностей преобразования поляризации при дифракции на поляризационных динамических решетках от вида сигнального пучка (гауссова и сингулярного), несмотря на наличие у сингулярного пучка орбитального момента. При считывании поляризационной решетки волной с круговой поляризацией поляризация дифрагированной волны остается круговой, но направление вращения меняется на противоположное (таблица 1, 5-й и 6-й столбцы).

При круговой поляризации сигнальной волны и линейной поляризации опорной волны (таблица 1, 7-й и 8-й столбцы) поляризация дифрагированной волны является эллиптической, сильно вытянутой вдоль направления поляризации считывающей волны. Такую ситуацию можно объяснить, представив круговую поляризацию сигнальной волны в виде суммы двух ортогональных линейно поляризованных волн со сдвигом фаз между ними. При одинаковых поляризациях записывающих голограмму волн формируется классическая динамическая голограмма, при дифракции на которой образуется волна с поляризацией, совпадающей с поляризацией считывающей волны. Ортогональная поляризационная компонента участвует в записи поляризационной голограммы, дифракция на которой дает ортогональную поляризационную составляющую для дифрагированной волны. Вследствие более низкой дифракционной эффективности поляризационной голограммы эта компонента имеет меньшую интенсивность, что приводит к формированию эллиптически поляризованного света.

Таблица 1. Состояния поляризации дифрагированной волны при различных состояниях поляризации взаимодействующих волн

Волны	Поляризация											
Опорная	↑	↑	↑	→	→	→	↑	↑	↻	↻	↻	↻
Сигнальная	↑	↑	→	↑	↑	↑	↻	↻	↻	↻	↻	↻
Считывающая	↑	→	↑	↑	↻	↻	→	↑	↑	→	↻	↻
Дифрагированная	↑	→	→	→	↻	↻	0	0	↻	↻	↻	×

При интерференции опорной и сигнальной волн в случае, когда обе волны имеют взаимно ортогональные круговые поляризации, также происходит запись поляризационной динамической голограммы. Особенностью такой схемы записи является наличие в любой точке среды линейной поляризации интерференционного поля, но с пространственной модуляцией направления поляризации. В результате в объеме среды наводится пространственная модуляция анизотропии поглощения. Восстановление такой голограммы волнами как с линейной, так и с круговой поляризацией позволяет получить дифрагированную волну с круговой поляризацией, причем поляризация дифрагированной волны совпадает с поляризацией сигнальной волны независимо от направления линейной поляризации считывающей волны, а также при поляризации считывающей волны, совпадающей с поляризацией опорной (таблица 1, 9-й, 10-й и 11-й столбцы). В случае восста-

новления голограммы волной с круговой поляризацией, ортогональной поляризации опорной волны, дифракция отсутствует (таблица 1, 12-й столбец). Таким образом, приведенные в работе результаты демонстрируют возможности преобразования топологической структуры и поляризации сингулярных световых пучков с использованием схем поляризационной динамической голографии. Сочетание поляризации излучения и топологического заряда в качестве информационных параметров позволяет объединить возможности поляризационной голографии и сингулярной оптики и на новых принципах осуществлять кодирование информации. Использование таких характеристик дифрагированного излучения в качестве нетривиальных информационных параметров перспективно для формирования скрытых изображений, которые одновременно могут совмещать технологию голографической защиты с записью кодированной информации.

#### Список источников

- [1] **Какичашвили, Ш. Д.** О поляризационной записи голограмм / Ш. Д. Какичашвили // Оптика и спектроскопия. — 1972. — Том 33. — № 2. — С. 324–327.
- [2] **Ормачеа, О.** Поляризационное многоволновое взаимодействие в растворах лазерных красителей / О. Ормачеа, А. Л. Толстик // Известия РАН. Сер. Физическая. — 2005. — Том 69. — № 8. — С. 1144–1146.
- [3] **Cheng, X.** Polarization of four-wave mixing with electromagnetically induced transparency / X. Cheng, Y. Du, Y. Zhang, Z. Wang, Y. Miao, Z. Ren, J. Bai. // Optics Communications. — 2012. — Vol. 285. — № 21–22. — P. 4507–4514.
- [4] **Tolstik, A. L.** Singular dynamic holography // Russian Physics Journal. — 2016. — Vol. 58. — № 10. — P. 1431–1440.
- [5] **Rubanov, A. S.** Nonlinear formation of dynamic holograms and multiwave mixing in resonant media / A. S. Rubanov, A. L. Tolstik, S. M. Karpuk, O. Ormachea // Optics Communications. — 2000. — Vol. 181. — № 1–3. — P. 183–190.

## Polarization dynamic holography

*A. L. Tolstik*

Belarusian State University, Minsk, Belarus

The polarization recording schemes for the dynamic holograms formed at orthogonal polarizations of signal and reference waves have been analyzed. The variants of orthogonal linear and orthogonal circular polarizations of the hologram recording waves have been considered. A special attention was focused at the singular polarization holograms formed by orthogonally polarized Gaussian and singular light beams. The possibility to control polarization of a singular wave due to changes in polarization of the waves involved in the interaction has been demonstrated.

**Keywords:** Holography, Polarization recording, Singular beams.

### 1.7. Роль лазерно-голографических технологий в становлении и развитии основных наукоёмких научно-технических направлений в ГИПО (к 60-летию юбилею ГИПО)

*В. П. Иванов, А. В. Лукин, А. И. Любимов, А. Н. Мельников, С. О. Мирумянц, А. Р. Насыров, Ф. А. Саттаров, А. Ф. Скошлов*  
АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе приведена краткая история возникновения лазерно-голографических технологий и их вклад в становление и развитие основных наукоёмких научно-технических направлений ГИПО. Рассмотрена перспектива развития этих технологий.

**Ключевые слова:** Лазерно-голографические технологии, Дифракционные оптические элементы, Голограммные дифракционные решетки, Синтезированные голограммные оптические элементы.

12 апреля 2017 года Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (АО «НПО «ГИПО») отметило свой 60-летний юбилей. Настоящий доклад посвящен лазерно-голографическим технологиям и их результатам, которые внесли значительную лепту в становление и развитие основных наукоёмких научно-технических направлений в ГИПО.

В начале 1960 годов в Государственном институте прикладной оптики — тогда это был Казанский филиал Государственного оптического института им. С. И. Вавилова (ГОИ) — были начаты разработки и исследования твердотельных лазеров (на рубине), затем — газовых лазеров (He–Ne), которые, в случае успеха, предполагалось использовать в качестве источников излучения в системах оптической связи и оптической локации. В опытных образцах этой аппаратуры, успешно испытанных летом 1962 года в одной из морских частей на побережье Черного моря, использовались мощные импульсные ксеноновые лампы собственной конструкции. Они были по многим параметрам хороши, но весьма широкополосны и слишком недолговечны.

С приходом в ГИПО в качестве руководителя лаборатории кандидата физико-математических наук К. С. Мустафина «лазерные» НИОКР приобрели статус одного из основных направлений института.

Затем эта тематика по решению руководящего ведомства была передана головной организации (ГОИ им. С.И. Вавилова), но в ГИПО остались материальные результаты прошлых разработок — действующие макетные образцы лазеров, в том числе одномодовый He–Ne лазер ( $\lambda = 632,8$  мкм) с рекордной для того времени выходной мощностью 60 мВт [1, 2]. На основе этого лазера были начаты первые «голографические» эксперименты, результаты которых сразу же получили признание и поддержку руководства ГИПО.

Лазерно-голографические технологии, разработанные в период с середины 1960-х по 1980-е гг. и внедренные в опытное производство нашего института, способствовали становлению и развитию шести из восьми основных научно-технических направлений ГИПО [3, 4], в частности:

— технология изготовления оптической компонентной базы (элементы асферической и дифракционной оптики) для оптико-электронного приборостроения — космического, спектрального, тепловизионного;

— прикладная голография;

— исследование оптических неоднородностей в прозрачных средах для газодинамики и баллистики, включая разработку интерференционно-теневых приборов и комплексов;

— конструкторско-технологические разработки контрольно-измерительных оптических и оптико-электронных приборов.

Эти технологии обеспечили проектирование и изготовление на базе ГИПО дифракционных оптических элементов (ДОЭ) различного назначения:

— голограммных дифракционных решеток — рельефно-фазовых и объемно-фазовых; физических голограммных оптических элементов — Notch-фильтров, селективных зеркал;

— синтезированных голограммных оптических элементов (СГОЭ) для контроля асферических оптических элементов, децентрировки линз, сборки и юстировки объективов, для создания контрольной аппаратуры на основе голограммного пробного стекла, для синтеза киноформных (многоуровневых) оптических элементов — силовых и корригирующих;

— товаров народного потребления (ТНП), включая декоративно-изобразительные голограммные изделия, наборы голограммных оптических элементов для образовательных целей — для школ, колледжей и ВУЗов.

В годы «перестройки» продукция лазерно-голографических технологий и, прежде всего, ДОЭ, а также ТНП на их основе, составляла существенную долю выручки ГИПО.

В АО «НПО «ГИПО» сохранены и развиваются основные лазерно-голографические технологии, и в настоящее время «точками роста» являются:

— разработка серийноспособных технологий выпуска элементов асферической и дифракционной оптики, в том числе путем прецизионной репликации [5];

— разработка технологий изготовления дифракционных решеток с высокой дифракционной эффективностью и повышенной лучевой стойкостью для лазерных компрессоров [6];

— разработка технологий изготовления дифракционных решеток для уникальных спектральных приборов, в том числе для многоканального спектрометра-полихроматора [7];

— разработка технологий изготовления светосильных дифракционных решеток для гиперспектральной аппаратуры космического базирования и сверхвысокочастотных периодических структур (тест-объектов, решеточных поляризаторов для видимого и ультрафиолетового диапазонов спектра), в том числе с использованием делительной машины маятникового типа [8];

— разработка методов и средств контроля юстировки крупноформатных телескопических систем и крупноформатных выпуклых рабочих асферических поверхностей линз и зеркал, в том числе на основе применения СГОЭ и асферо-голограммного пробного стекла [9–12].

Таким образом, лазерно-голографические технологии АО «НПО «ГИПО» имеют значительный научно-технологический задел, реализация которого позволит существенно увеличить объем выпуска наукоёмкой продукции — элементов дифракционной и асферической оптики и изделий на их основе — в интересах отечественного оптико-электронного приборостроения, а также на экспорт.

#### Список источников

- [1] **Лукин, А. В.** Лазерно-голографическая предыстория ГИПО / А. В. Лукин, Е. И. Штырков / Как это было... Воспоминания создателей отечественной лазерной техники. — Ч. 1. — М.: ЛАС-ФИАН, 2006. — С. 312–313.
- [2] **Белозёров, А. Ф.** Казанская научная школа голографии / А. Ф. Белозёров, А. В. Лукин / Как это было... Воспоминания создателей отечественной лазерной техники. — Ч. 5. — М.: ЛАС-ФИАН, 2016. — С. 116–130.
- [3] Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (1957–1997 гг.) / Под ред. докт. физ.-мат. наук проф. С. О. Мирумянца / Науч.-техн. сб. — Ч. 1. — Казань: Дом печати, 1997. — 352 с.
- [4] Полвека в мире оптики. — Казань: Центр инновационных технологий, 2007. — 212 с.
- [5] **Ахметов, М. М.** Научно-производственный комплекс серийной прецизионной репликации элементов асферической и дифракционной оптики / М. М. Ахметов, А. Ф. Белозёров, В. А. Балоев, А. А. Белокопытов, И. С. Гайнутдинов, В. П. Иванов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, И. А. Могилюк // Контенант. — 2016. — Том 15. — № 3. — С. 39–42.
- [6] **Ахметов, А. Р.** Диелектрические дифракционные решетки с высокой лучевой стойкостью для компрессии лазерных импульсов / А. Р. Ахметов, М. М. Ахметов, А. А. Белокопытов, А. И. Любимов, А. Ф. Скочиллов // Контенант. — 2016. — Том 15. — № 4. — С. 16–18.
- [7] **Тугаринов, С. Н.** Новый класс спектрометров-полихроматоров высокого разрешения на основе пропускающих объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток / С. Н. Тугаринов, А. А. Белокопытов, А. В. Лукин, Н. Н. Науменко, Ф. А. Саттаров, В. В. Серов, Н. М. Шигапова, В. П. Ярцев // Контенант. — 2016. — Том 15. — № 3. — С. 43–49.
- [8] **Лукин, А. В.** Делительная машина маятникового типа применительно к решению проблемы изготовления нарезных дифракционных решеток на неплоских подложках / А. В. Лукин, А. Н. Мельников / Голография. Наука и практика: 13-я междунар. конф. «ГолоЭкспо 2016», 12–15 сентября 2016 г., Ярославль, Россия: Тезисы докладов / МГТУ им. Н. Э. Баумана, ООО «МНГС». — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — С. 198–199.
- [9] **Балоев, В. А.** Прецизионный метод контроля юстировки двухзеркальных телескопов на основе использования системы кольцевых синтезированных голограмм / В. А. Балоев, В. П. Иванов, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочиллов, А. М. Ураскин, Ю. П. Чугунов // Оптический журнал. — 2012. — Том 79. — № 3. — С. 56–64.
- [10] **Белозёров, А. Ф.** Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Часть I / А. Ф. Белозёров, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Фотоника. — 2014. — № 4. — С. 12–32.
- [11] **Лукин, А. В.** Контроль зеркала контррефлектора телескопа «Миллиметр» на основе использования синтезированной голограммы / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочиллов // Фотоника. — 2016. — № 5. — С. 44–48.
- [12] **Лукин, А. В.** Лазерный интерферометр с асферо-голограммным пробным стеклом для термобарокамеры / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочиллов // Оптический журнал. — 2017. — Том 84. — № 3. — С. 65–66.

## **The role of laser and holographic technologies in the formation and development of the main science-intensive scientific and technical directions of the GIPO**

*V. P. Ivanov, A. V. Lukin, A. I. Lyubimov, A. N. Melnikov, S. O. Mirumyants, A. R. Nasyrov,  
F. A. Sattarov, A. F. Skochilov*

Scientific and Production Association "State Institute of Applied Optics", Kazan, Russia

The present paper deals with a brief history of the emergence of laser and holographic technologies and their contribution to the formation and development of the main science-intensive scientific and technical directions of the GIPO. The perspective of development of these technologies is considered.

**Keywords:** Laser and holographic technologies, Diffraction optical elements, Hologram diffraction gratings, Computer-generated hologram optical elements.

## 1.8. Лазерные технологии для формирования структуры дифракционных оптических элементов

А. Г. Полещук<sup>1</sup>, В. П. Вейко<sup>2</sup>, В. П. Корольков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Приведен обзор работ, выполненный коллективами ИАиЭ СО РАН и ИТМО в области разработки лазерных технологий для формирования дифракционных и микрооптических элементов.

**Ключевые слова:** Дифракционные оптические элементы, Лазерные технологии.

### Введение

Расширение области применения дифракционных и микрооптических компонентов во многих отраслях промышленности, особенно, таких как оптическая связь, приборостроение и биомедицина, стимулировало потребность в развитии технологий и оборудования для их производства. При этом упор в новых разработках делается на повышение разрешающей способности, повышения производительности и точности процессов формирования микрорельефа. Существенная часть технологий создания оптических элементов с микрорельефом основана на применении лазерного излучения. В свое время появление He—Cd и Ag<sup>+</sup> лазеров, генерирующих излучение в области чувствительности общедоступных рельефообразующих материалов — фоторезистов — стимулировало развитие методов прямой лазерной записи сначала бинарных, а затем и многоуровневых [1, 2] дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и микрооптических элементов (МОЭ) путем управления интенсивностью записывающего пучка синхронно с его перемещением (сканированием) по поверхности светочувствительного материала. Необходимо отметить, что первые эксперименты по записи кусочно-непрерывного рельефа были выполнены с помощью He—Ne лазеров на пленках халькогенидов [3].

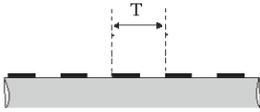
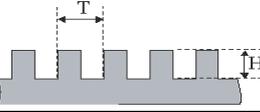
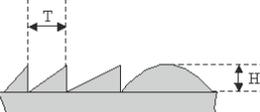
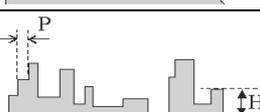
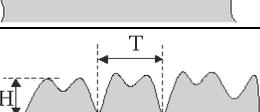
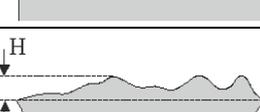
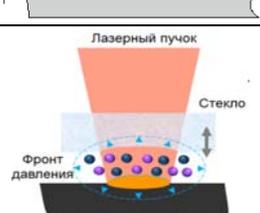
В последние годы появилось несколько новых направлений дифракционной оптики, которые дадут возможность совершить качественный скачок в управлении светом. Одно из них — создание ДОЭ, работающих в *резонансной области* [4]. Новые дифракционные элементы могут управлять всеми компонентами оптического излучения (амплитудой, фазой и поляризацией) и имеют высокую дифракционную эффективность. Характерные размеры микроструктуры для видимой области спектра составляют около 0,25—0,5 мкм. Другое перспективное направление — синтез ДОЭ с *глубоким рельефом* [5]. В этом случае оптические элементы совмещают в себе достоинства классической (рефракционной) оптики (ахроматичность) с гибкостью дифракционной. ДОЭ с глубоким рельефом позволяют фокусировать и преобразовывать обычный «белый» свет. Микроструктура таких ДОЭ должна иметь рельеф оптической поверхности с плавно изменяющейся высотой в диапазоне от нуля до десятков

микрометров. И, наконец, ДОЭ на *сферических поверхностях* [6], позволяющие создать новые элементы лазерной оптики, оптических и рентгеновских телескопов, системы многоканальной оптической связи и др. Характеристики и типичные примеры технологий для изготовления дифракционных микроструктур представлены в таблице 1.

До последнего времени для изготовления ДОЭ в основном применялось оборудование, ранее созданное для производства изделий микроэлектроники. Однако топологическая структура поверхности ДОЭ имеет произвольный характер, задаваемый распределением фаз световой волны, в то время как структура поверхности микросхемы представляет собой систему линий и прямоугольников. Структура поверхности ДОЭ может иметь минимальные размеры менее половины длины волны света (0,2—0,5 мкм), однако, общие размеры могут достигать десятков сантиметров и даже метров в диаметре, что во много раз больше размеров кристалла микросхемы. Требования современной дифракционной оптики ставят такие задачи, которые не имеют адекватного решения из-за отсутствия технологических комплексов (сочетание устройства и технологии) для микропрофилирования оптических поверхностей с минимальным размером элементов микроструктуры менее 0,5 мкм и световым полем до 200—300 мм и более. Абсолютная точность топологии элемента должна быть на уровне 1/20 от размера наименьшей дифракционной зоны, т. е. около 20 нм. Кроме того, высота рельефа синтезируемой структуры должна плавно меняться от нуля до десятков микрометров на одном скате при крутом переходе от зоны к зоне. Таким образом, поиск новых путей решения проблемы синтеза высокоэффективных и точных ДОЭ представляется весьма актуальным.

Существенный вклад в развитие технологий синтеза дифракционных и микрооптических элементов внесли исследования, выполненные в ИАиЭ СО РАН и ИТМО как совместно, так и по отдельности. Объединяющим направлением стало развитие термохимического метода лазерной записи, впервые предложенного в ИТМО и доведенного до уровня практической технологии в ИАиЭ СО РАН. В настоящей работе дан обзор исследований, выполненных обеими коллективами в области разработки лазерных технологий для

Таблица 1

№	Технология	Вид структуры	Характерные параметры
1	Лазерная термохимическая запись хромовой маски		Минимальный период: $T \approx 1$ мкм Пропускание: $t = (2-3)D$
2	Реактивное ионное травление (РИТ) через хромовую маску		Минимальный период: $T \approx 2$ мкм Высота рельефа: $H = \lambda/2(n-1)$
3	Прямая лазерная запись на фоторезисте +РИТ		Минимальный период: $T \approx 3$ мкм Высота рельефа: $H = m\lambda/(n-1)$
4	Многошаблонная контактная фотолитография		Минимальный пиксел: $P \approx 1,5$ мкм Высота рельефа: $H = \lambda/(n-1)$
5	Проекционная фотолитография с растровым фотошаблоном +РИТ		Минимальный период: $T \approx 5$ мкм Высота рельефа: $H = \lambda/(n-1)$
6	Контактная фотолитография с зазором +РИТ		Пространственные частоты $< 1$ мм <sup>-1</sup> Высота рельефа: $H = (1-10)\lambda/(n-1)$
7	Технология лазерно-индуцированной микроплазмы		Пространственные частоты $< 1$ мм <sup>-1</sup>

формирования дифракционных и микрооптических элементов.

**1. Лазерная термохимическая технология: изготовление хромовых масок**

Термическое воздействие лазерного излучения положено в основу ряда методов получения микроструктур на тонких пленках. Особенностью лазерной термохимической технологии (ЛТТ) является то, что под действием инициированного лазерным излучением нагрева тонкой пленки металла, в частности хрома, в пленке протекают химические и физические процессы, локализованные в пределах нагреваемой зоны, т. е. образуется скрытое «термохимическое изображение» [7]. На рисунке 1 приведена последовательность операций ЛТТ. Тонкая пленка хрома толщиной примерно 50–80 нм наносится на поверхность оптической пластины (Этап I). Далее, проводится запись структуры сфокусированным пучком мощного лазера с образованием скрытого изображения (II). Пленка в этой области отличается по своему физическому и химическому составу от исходной пленки, что позволяет выявить структуру изображения [8] путем жидкостного химического травления (III).

Применение ЛТТ наиболее оправдано при изготовлении ДОЭ амплитудного типа, которые обычно состоят из непрозрачных полос (дифракционных зон) с переменными шириной и периодом (Этап III на рисунке 1). Это обусловлено тем, что в ряде случаев дифракционная структура должна наноситься на выпуклые или вогнутые оптические поверхности или подложки большой толщины и размера [9]. Указанные специфические особенности ограничивают применение известной технологии фотолитографии (основанной на применении фоторезистов) для изготовления прецизионных и крупногабаритных ДОЭ. Очевидно, что термохимический метод изготовления структуры ДОЭ в тонких пленках хрома позволяет существенно упростить процесс изготовления и увеличить его точность.

**2. Лазерная записывающая система**

В ИАиЭ СО РАН разработана и создана круговая лазерная записывающая система (генератор изображений) CLWS-300IAE [10], для изготовления высококачественных ДОЭ в полярной системе координат. Подложка, покрытая светочувствительным слоем, вращается с постоянной угловой скоростью, в то время как сфокусированный записывающий пучок лазерного

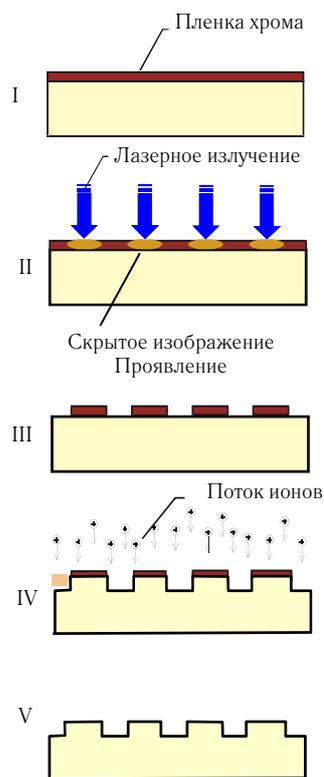


Рис. 1. ЛТТ изготовления микрорельефа

излучения перемещается вдоль прямой линии, пересекающей центр вращения (рисунок 2а). Это позволяет достигать высокой скорости записи. В качестве светочувствительного материала используются пленки хрома. Основные характеристики устройства приведены в таблице 2

### 3. Изготовление ДОЭ с бинарным фазовым рельефом

В дифракционной оптике используются элементы, как с прямоугольным, так и с пилообразным профилем поверхности. На рисунке 1 показан процесс создания микрорельефа ДОЭ с прямоугольным профилем. Как было сказано выше, после проявления (Этап III) формируется микроструктура из хрома на поверхности пластины. Для получения микрорельефа в стекле (или кварце), проводится реактивное ионное травление (IV) пластины. На последнем этапе (V) остатки хрома стравливаются. Таким путем изготавливаются рельефные дифракционные структуры с минимальными размерами в доли микрометра.

### 4. Изготовление ДОЭ с многоуровневым, пилообразным и непрерывным профилем

Ступенчатый, многоуровневый профиль рельефа соответствует квантованной по  $M$  уровням фазовой функции  $\varphi(x, y)$  ДОЭ с шагом  $\Delta\varphi$ . Многоуровневый метод позволяет достаточно просто изготавливать и тиражировать ДОЭ. Комплект из 3–4 фотошаблонов дает возможность получить многоуровневые ( $M = 8–16$ ) ДОЭ с ДЭ более 95 %. Однако возможности многоуровневого метода оказываются ограниченными при

Таблица 2. Характеристики CLWS-300IAE

Характеристика	Значение
Максимальный диаметр области записи	300 мм
Толщина подложки	1,5–24 мм
Минимальная ширина записываемой структуры	0,6 мкм
Скорость вращения	12–15 об/сек
Точность перемещения по радиусу (СКО)	0,02 мкм
Точность определения угла поворота (СКО)	1"
Длина волны записывающих лазеров	405, 532 нм

изготовлении ДОЭ с малым периодом  $T$  зон. Это обусловлено тем, что размер элементарной ступеньки составляет  $T/M = 0,5–1$  мкм для ДОЭ, работающих в видимом диапазоне. При таких малых размерах ступенек точность совмещения фотошаблонов (доли микрометра в лучших фотолитографических установках) начинает играть ведущую роль, приводя к падению ДЭ и возрастанию шумов.

Изготовить ДОЭ с высокой дифракционной эффективностью можно с использованием одного полутонового фотошаблона (ПФ) [3]. При этом отпадает необходимость в совмещении фотошаблонов, а минимальные размеры фазового профиля ДОЭ определяются только процессом контактной или проекционной фотолитографии. Этот метод получил название «полутонового» (gray-tone method).

#### 4.1. Прямая лазерная запись полутоновых фотошаблонов (ПФ)

Полутоновая технология позволяет применить как многократную контактную печать без зазора, так и высокоразрешающую проекционную печать с уменьшением. Наиболее экономически эффективно изготавливать ПФ с помощью прямой лазерной записи сфокусированным пучком на материалах, изменяющих коэффициент поглощения при нагреве высокоинтенсивным лазерным излучением, но остающихся стабильными под воздействием актиничного ультрафиолетового излучения при переносе структуры шаблона в фоторезист.

Нами исследовано два материала этого типа: пленки аморфного кремния (a-Si) толщиной 50–100 нм и так называемые LDW-стекла [11]. Степень просветления материала зависит от мощности записывающего пучка и скорости сканирования. На рисунке 3 приведен график зависимости пропускания для LDW-стекла от мощности записывающего лазерного пучка и микрофотография ПФ. Для получения рельефа достаточной глубины необходимо, чтобы контраст (отношение пропускания облученной пленки к пропусканию исходной пленки  $T_{ir}/T_a$ ) полученного рисунка лежал в пределах от 3 до 15 для  $\lambda = 436$  нм. Эта величина без труда достигается при использовании обоих материалов. Однако максимальное пропускание кремниевых фотошаблонов значительно ниже, чем фотошаблонов на основе LDW-стекла.

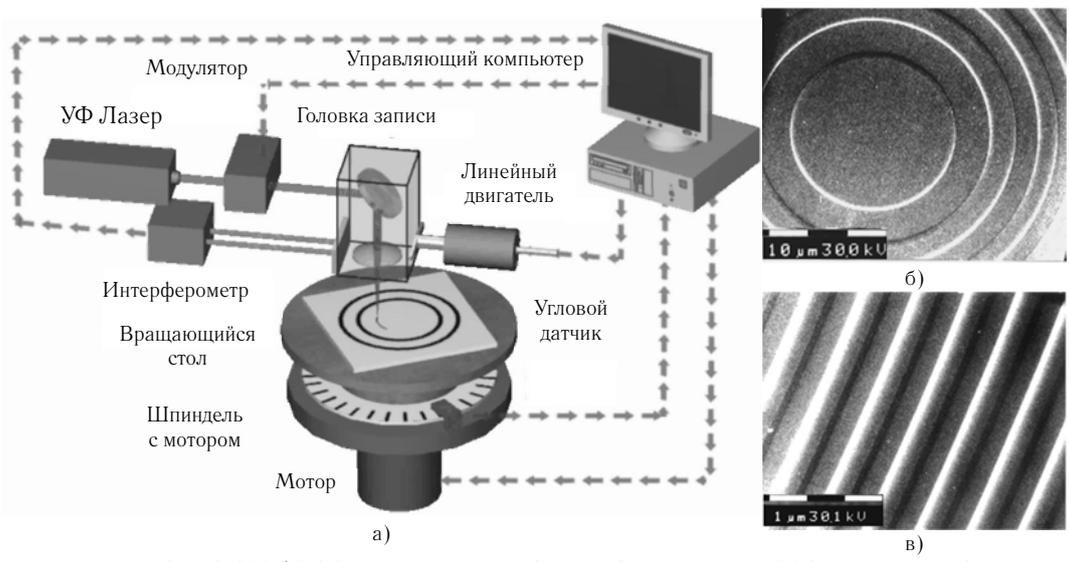


Рис. 2. Схема установки CLWS-300IAE (а) и примеры микрофотографий структуры ДОО диаметром 210 мм записанной на пленке хрома методом ЛТТ в центре (б) и на краю (в)

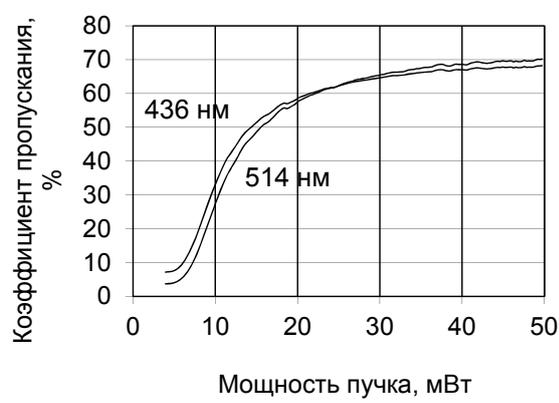


Рис. 3. Зависимости пропускания ПШ на длинах волн 514 и 436 нм от мощности лазерного пучка для LDW-стекла

**4.2. Лазерная запись многоуровневых фазовых ДОО по фоторезисту**

Прямая лазерная запись (ПЛЗ) по фоторезисту хорошо зарекомендовала себя при изготовлении дифракционных оптических элементов с непрерывным профилем [12]. Основные этапы этого метода приведены на рисунке 4. В качестве регистрирующих сред (Этап I) обычно используют позитивные низкоконтрастные фоторезисты для ближнего УФ диапазона, например, из серии S1800 (Shipley), AZ1500, AZ6600, AZ9000 (Clariant), а также российский фоторезист ФП-383 (ФРАСТ-М). Формирования рельефа (Этап II) основано на создании необходимого распределения экспозиции в фоторезисте путем сканирования сфокусированного пучка по поверхности пленки фоторезиста и последующего проявления фоторезиста в жидком щелочном проявителе (Этап III). Экспонирование фоторезиста может производиться на актиничной длине волны в диапазоне 300–470 нм. Типичная чувствительность фоторезистов лежит в диапазоне 50–100 мДж/см<sup>2</sup>. Для формирования микрорельефа используются низкоконтрастные проявители на основе

щелочей КОН или NaOH. Рельеф, сформированный на поверхности пленки фоторезиста, может переноситься в материал подложки с помощью реактивного ионного травления (Этапы IV и V).

Одним из преимуществ ПЛЗ по фоторезисту является практически линейная зависимость глубины профиля от дозы экспозиции после некоторого порогового значения. Выход на этот участок без потери динамического диапазона управления мощностью лазерного излучения возможен за счет равномерной предэкспозиции. В сравнении с полутонным фотолитографическим процессом ПЛЗ на фоторезисте лучше всего подходит для мелкосерийного производства и создания прототипов по причине низких затрат на изготовление

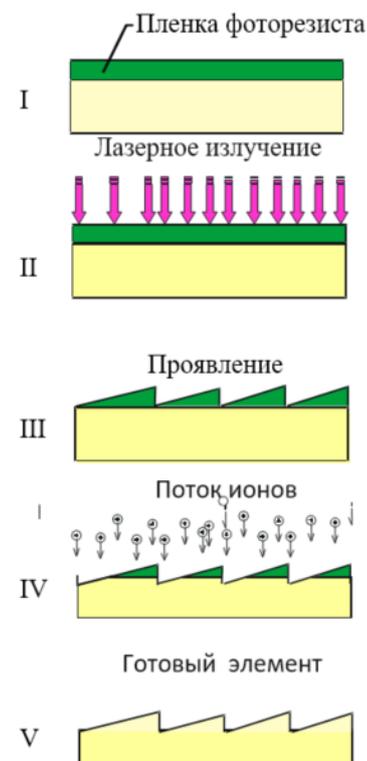


Рис. 4. Технология ПЛЗ по фоторезисту

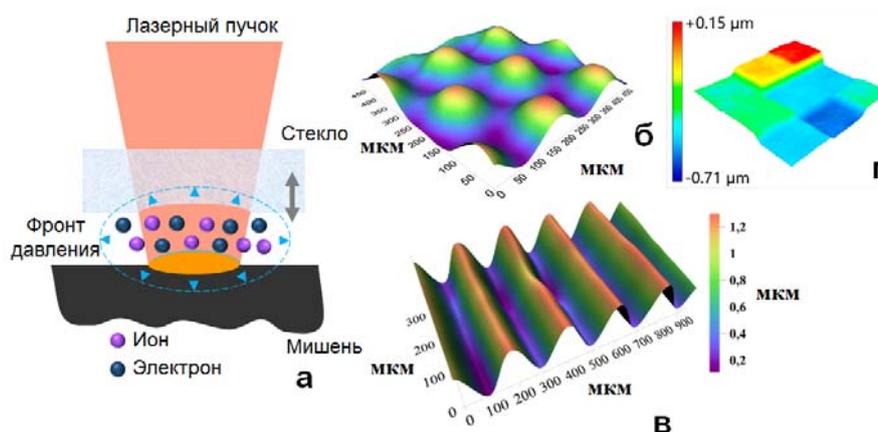


Рис. 5. Схематическое изображение метода обработки стекла ЛИМП (а). Формируемые микрооптические элементы: массив микролинз (б), фазовая решетка (в), многоуровневая случайная фазовая пластина (г)

и отсутствия дополнительных искажений профиля, возникающих при переносе изображения методом контактного копирования или проекционной фотолитографии. Последняя причина очень важна для высокоэффективных и высокоточных ДОЭ.

### 5. Обработка материалов лазерно-индуцированной микроплазмой

ДОЭ с низкой пространственной частотой могут изготавливаться с помощью микро- и наноразмерной обработки поверхности прозрачных для оптического излучения материалов, находящихся в плотном контакте с поглощающей мишенью, лазерной плазмой, образующейся на границе раздела сред (рисунок 5а) [13]. Такой вырожденный в горячее пятно лазерный факел — лазерно-индуцированная микроплазма (ЛИМП) представляет собой высокоточный инструмент прямой обработки поверхности прозрачных материалов, который управляется характеристиками лазерного излучения и положением лазерного пучка в пространстве. Выбор источника лазерного излучения определяется следующими факторами:

- длина волны излучения должна лежать в окне прозрачности обрабатываемого материала, если излучение проходит сквозь него, и максимально поглощаться мишенью, что необходимо для эффективного преобразования энергии лазерного излучения в энергию плазмы;

- плотность энергии лазерного излучения на поверхности мишени должна быть достаточной для образования плазмы с температурой и давлением, обеспечивающими ионное травление обрабатываемого плазмой материала, для чего в большинстве случаев используют наносекундные лазерные импульсы.

Эффективность преобразования энергии лазерного излучения в энергию плазмы при воздействии на поверхность мишени является ключевым фактором. При обработке прозрачных материалов методом ЛИМП высокая эффективность такого преобразования, близкая к 100 %, обеспечивается использованием

в качестве мишени «абсолютно черного тела». Примером такой мишени могут служить углеродные материалы с низким коэффициентом отражения и малыми тепловыми потерями при короткой длительности воздействия. В свою очередь, энергия микроплазмы, как субстанции тяжелых частиц: атомов и ионов, — с минимальными потерями используется на нагрев и ионную бомбардировку поверхности обрабатываемого материала. Углеродная микроплазма, формируемая наносекундными импульсами волоконного лазера, обладает высокой температурой компонента (более 14000 К), большим временем жизни (до 20 мс), а также создает высокое давление (1 ГПа). В итоге, эффективность передачи энергии от лазерного излучения ближнего ИК к прозрачному материалу достигает 90 %. В качестве источника излучения для обработки прозрачных материалов может быть использован Yb волоконный лазер с длиной волны излучения 1,07 мкм, длительностью импульсов 50–200 нс, частотой их следования 20–70 кГц и средней мощностью излучения до 20 Вт. Время действия на материал лазерно-индуцированной микроплазмы определяется наносекундной длительностью импульсов и немногим превышает ее.

В процессе воздействия микроплазмы на оптический материал происходит его нагрев и ионная бомбардировка обрабатываемой поверхности с последующим образованием микро рельефа. При этом положение и характеристики микроплазмы, включая ее время жизни, достаточно точно управляются пучком лазерного излучения. Более того, пространственные характеристики лазерного пучка такие как, размер перетяжки, ее длина вдоль оптической оси, а также положение относительно поверхности мишени, также влияют на характер формируемой микроплазмы. С помощью ЛИМП на кварцевом стекле возможно изготовление массивов микролинз с диаметром линз от 80 до 300 мкм, числовой апертурой от 0,075 до 0,004, стрелкой прогиба до 1–2 мкм, радиусом кривизны до 3 мм (рисунок 5б) [14]. Фазовые дифракционные решетки с прямоугольным и синусоидальным профилями изго-

тавливаются таким способом при сканировании лазерного пучка по прямолинейной траектории (рисунок 5в). Период решеток варьируется в диапазоне 25–200 мкм и может плавно изменяться, в зависимости от способа сканирования. Высота рельефа может задаваться в диапазоне 0,2–5,0 мкм с шагом  $60 \pm 10$  нм. Также могут быть изготовлены многоуровневые (до 5 уровней) ДОО оптического качества, что успешно применяется для записи случайных фазовых пластин с бинарной и дискретной структурой (рисунок 5г). Такие элементы используются для гомогенизации лазерных пучков высокой мощности. Размер фазового минимального элемента (пиксела) лежит в пределах 250–350 мкм.

Способ обработки прозрачных материалов ЛИМП открывает новые возможности для эффективного создания различных микрооптических компонентов во многих приложениях фотоники, например, для

создания пассивных преобразователей профиля лазерных пучков. В среднем, время формирования массива микролинз на кварцевом стекле с размерами массива  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup> и размером одиночной микролинзы 100 мкм составляет 10–15 минут.

### Заключение

Результаты проведенных исследования показывают, что лазерные методы формирования хромовых масок и микрорельефа поверхности являются мощным и гибким инструментом для изготовления растров, шкал, дифракционных и микрооптических элементов. Ряд эти методов уже практически апробирован и используется в практике оптического приборостроения [15].

### Благодарности

Данная работа поддержана грантом РНФ № 19-01721.

### Список источников

- [1] **Gale, M. T.** The fabrication of fine lens arrays by laser beam writing / M. T. Gale, K. Кноп // Proceedings of SPIE. — 1983. — Vol. 398. — С. 347–353.
- [2] **Gale, M. T.** Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists / M. T. Gale, M. Rossi, J. Pedersen // Optical Engineering. — 1994. — Vol. 33. — P. 3556–3566.
- [3] **Коронкевич, В. П.** Изготовление киноформных оптических элементов в халькогенидных тонких пленках / Автометрия. — 1976. — № 5. — С. 3–9.
- [4] **Glaser, T.** High efficiency binary phase-transmission-grating / T. Glaser, S. Schroter, H. Bartelt, R. Pohlmann // EOS Topical Meeting Digest Series // Diffractive Optics. — 1997. — Vol. 12. — P. 32.
- [5] **Faklis, D.** Spectral properties of multiorder diffractive lenses / D. Faklis, M. Morris // Applied Optics. — 1995. — Vol. 34. — P. 2462.
- [6] **Grange, R.** Aberration reduced holographic spherical gratings for Rowland circle spectrographs // Applied Optics. — 1992. — Vol. 31. — № 19. — P. 3744–3749.
- [7] **Вейко, В. П.,** Термохимическое действие лазерного излучения / В. П. Вейко, Г. А. Котов, М. Н. Либенсон, М. Н. Никитин // Доклады АН СССР. — 1993. — Том 208. — С. 587–590.
- [8] **Коронкевич, В. П.** Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома / В. П. Коронкевич, А. Г. Полещук, Е. Г. Чуринов, Ю. И. Юрлов // Квантовая электроника. — 1985. — Том 12. — № 4. — С. 755–761.
- [9] **Burge, J. H.** Application of computer-generated hologram for interferometric measurement of large aspheric optics // Proceedings of SPIE. — 1995. — Vol. 2576. — P. 258–269.
- [10] **Poleshchuk, A. G.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure / A. G. Poleshchuk, E. G. Churin, V. P. Koronkevich, V. P. Korolkov etc. // Applied Optics. — 1999. — Vol. 38. — С. 1295–1301.
- [11] **Korolkov, V. P.** Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs / V. P. Korolkov, A. I. Malyshev, V. G. Nikitin, A. G. Poleshchuk, A. A. Kharissov, V. V. Cherkashin, C. Wu // Proceedings of SPIE. — 1999. — Vol. 3633. — P. 129–138.
- [12] **Korolkov, V. P.** Metrological features of diffractive high-efficiency objectives for laser interferometry / V. P. Korolkov, C. Pruss, S. Reichelt, H. J. Tiziani // Proceedings of SPIE. — 2002. — Vol. 4900. — P. 873–884.
- [13] **Zakoldaev, R.** Laser-induced Black-body Heating (LIBBH) as a Method for Glass Surface Modification / R. Zakoldaev, M. Sergeev, G. Kostyuk, V. Veiko // Journal of Laser Micro Nanoengineering. — 2015. — Том 10. — № 1. — С. 15–19.
- [14] **Kostyuk, G.** Microlens array fabrication on fused silica influenced by NIR laser / G. Kostyuk, R. Zakoldaev, M. Sergeev, E. Yakovlev // Applied Physics B. — 2016. — Том 122. — № 4. — С. 1–8.
- [15] **Кручинин, Д. Ю.** Исследование угловых погрешностей круговых оптических шкал, изготовленных с использованием лазерного генератора изображений CLWS-300 / Д. Ю. Кручинин, О. В. Яковлев // Оптический журнал. — 2011. — Том 78. — № 6. — С. 47–50.

## **Laser technologies for the formation of the structure of diffractive optical elements**

*A. G. Poleshchuk<sup>1</sup>, V. P. Veyko<sup>2</sup>, V. P. Korolkov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

A review of the works carried out by the teams of the IAE SB RAS and ITMO in the field of developing laser technologies for the formation of diffraction and micro-optical elements is presented.

**Keywords:** Diffraction optical elements, Laser technologies.

### 1.9. Голографические оптические элементы в устройствах виртуальной реальности

А. Н. Путилин<sup>1</sup>, А. В. Морозов<sup>1,2</sup>, В. В. Дружин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Исследовательский Центр Самсунг, Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена анализу применения голографических оптических элементов в схемах виртуальных дисплеев (VR), в частности, в наголовных дисплеях (HMD) и встраиваемых перед зрителем (HUD) дисплеях. Рассматриваются различные типы голограмм, выполняющие роль оптических элементов совмещения изображения (Beam combiners), осветительных элементов для LCD и LCOS матриц, а также элементов компенсации и предискажения изображения в схемах дисплеев дополненной реальности (AR).

**Ключевые слова:** Голографические оптические элементы, HMD, HUD, Волноводная голография, Дисплеи дополненной реальности.

#### Введение

Большинство современных мобильных устройств используют максимально возможный для уровня технологии производителя размер дисплея. Таким образом, соотношение размера мобильного устройства к размеру дисплея ( $R_s$ ) является показателем уровня технологии для устройств, присутствующих на рынке, например, наиболее продвинутые устройства достигли  $R_s$  порядка 0,85. Но, для будущих мобильных устройств  $R_s = 1$  не будет пределом, только дисплеи передут к технологии виртуальных изображений. Первые опыты, произведенные Google, Microsoft и Epson по широкому внедрению VR дисплеев в массовое производство пока буксуют, однако разрабатываемое второе поколение HMD, надеемся, преодолет детские болезни «первого» и будет гораздо более функциональным. Не последнюю роль в успехе миниатюризации и расширении функциональных возможностей VR дисплеев могут сыграть голографические оптические элементы [1].

#### Функциональные элементы виртуальных дисплеев

Наиболее критичным элементом VR дисплеев является «Beam Combiner» (BC) — элемент совмещения локальной информации, формируемой приватным

источником информации с глобальной, то есть окружающей обстановкой. В большинстве случаев ограничивающим фактором является продольный размер ВС. На рисунке 1 показаны типичные зоны формирования полезной информации и зоны блокируемой окружающей обстановки для призматического и голографического ВС. При определении требований к FOV VR можно определить и блокируемые области окружающей обстановки, так, при FOV порядка 250 блокирующие области занимают не менее 90 по сторонам основного поля зрения, потеря такого пространства для оператора HMD совершенно недопустима [2]. С другой стороны, для голографических ВС такой проблемы не возникает.

Для голографических ВС наибольшей проблемой считаются хроматические аберрации и компенсация искажений неосевых пучков [3]. Вообще в схемах VR дисплеев неосевые пучки, характерные для работы голографических оптических элементов могут играть очень положительную роль, на рисунке 2 показана обобщенная схема построения компактного HMD с применением различных функциональных голографических оптических элементов.

В частности, голограммы могут выполнять роль: голографических ВС (Holographic beams combiners), изображающих линз (Holographic imaging lenses),

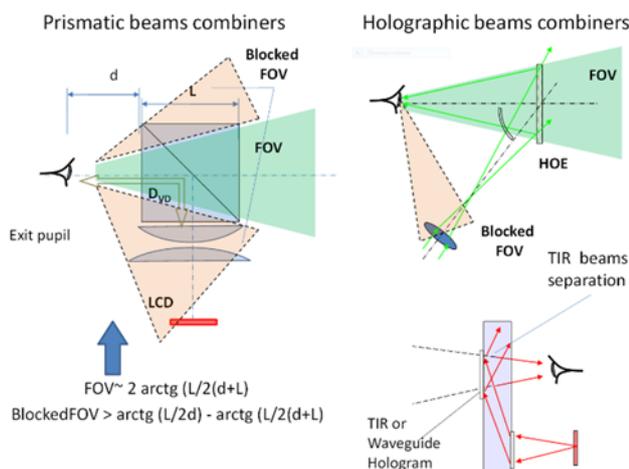


Рис. 1. Конфигурация полезных и блокирующих зон для разных видов ВС

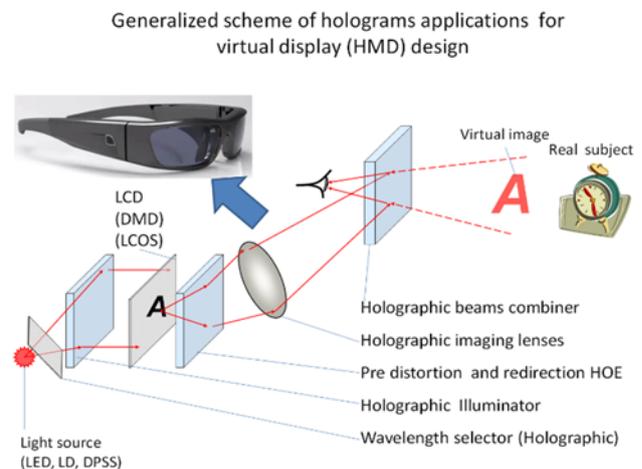


Рис. 2. Обобщенная схема построения компактного HMD с применением различных функциональных голографических оптических элементов

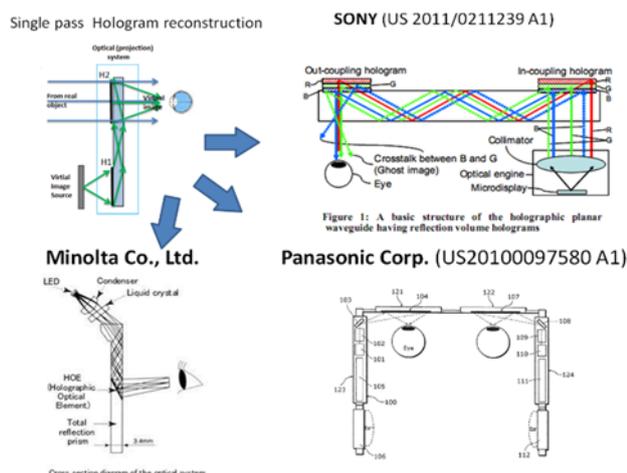


Рис. 3. Схемы НМД с однократным воспроизведением голограммы волноводной или объемной воспроизводящей волной

элементов предискажения или компенсации угловых сдвигов информационных пучков (Pre distortion and re-direction HOE), голографических осветителей (Holographic Illuminators) и, при необходимости, спектральных селекторов (Wavelength Holographic selectors). Большинство оптических схем НМД разрабатывается в конфигурации «очки», то неосевой характер голографических схем хорошо подходит для размещения вдоль дужки «очков».

### Особенности применения голографических оптических элементов в виртуальных дисплеях

Кроме неосевых конфигураций голографических НМД оказывается очень полезно свойство голограмм, особенно Брегговских, не оказывать воздействие на лучи, далекие от углов падения записывающих пучков, мешающие блики в значительной степени оказываются подавленными. Для схем построения VR дисплеев с применением волноводных голограмм, появляется исключительно полезное свойство полного разделения дифрагированных в свободное пространство полезных лучей и не дифрагированных лучей, ограниченных ПВО распространением в объеме волновода. При этом возможно использование однократного воспроизведения волноводной голограммы — рисунок 3 и многократное воспроизведение голограммы при волноводном распространении — рисунок 4. Применение отдельной записи нескольких голограмм, работаю-

Голографические перископические НМД с многократным воспроизведением

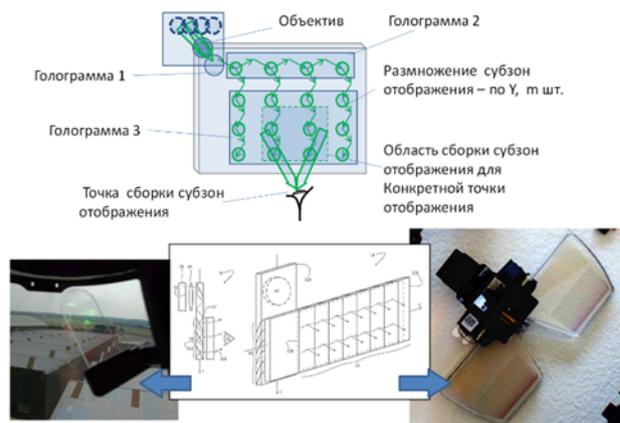


Рис. 4. Схемы НМД с многократным воспроизведением голограммы волноводной волной

щих каждая в своем спектральном диапазоне, позволяет компенсировать большинство хроматических aberrаций (рисунок 3, правый верхний угол) [4].

Многократное воспроизведение голограммы волноводной волной, в большинстве случаев ограничено перископическими схемами, не имеющими оптической силы, поэтому формируемое виртуальное изображение должно находиться, практически, на бесконечности. Это ограничивает области применения таких дисплеев, как Hololens (Microsoft Corp.) [5] или BAE Systems дисплеями для водителей или летчиков. Особенностью многократного воспроизведения волноводных перископических голограмм (рисунок 4) является естественный синтез выходного зрачка для каждой позиции глаза зрителя и применение сравнительно слабо светосильных изображающих окуляров. Однако это полезное свойство размещается на очень низкую эффективность всей схемы голографического волноводного перископа, обратно пропорциональную количеству переотражений в области воспроизведения голограмм.

### Заключение

Анализ вариантов построения VR с применением голографических оптических элементов показывает большой потенциал улучшения их функциональности, по сравнению с традиционной оптикой. Появляется возможность снизить количество оптических элементов в схемах благодаря записи функциональных голограмм, выполняющих роль голографических ВС, изображающих линз, элементов предискажения, голографических осветителей и спектральных селекторов.

### Список источников

- [1] Kim, N. Holographic Optical Elements and Application, Holographic Materials and Optical Systems / Nam Kim, Yan-Ling Piao, Hui-Ying Wu. — InTech.
- [2] Cakmakci, O. Head-Worn Displays: A Review / O. Cakmakci, J. Rolland // Journal of Display Technology. — 2006. — Vol. 2. — № 3. — P. 199–216.
- [3] Юу, Ф. Т. С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию: пер. с англ. / Ф. Т. С. Юу. — Москва: Сов. Радио. — 1979. — 304 с.
- [4] Mukawa, H. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms / H. Mukawa, K. Akutsu, I. Matsumura, S. Nakano, T. Yoshida, M. Kuwahara, K. Aiki // J. Soc. Info. Disp. — 2009. — № 17. — P. 185–193.

- [5] Патент № 2016 028 828 WO. AI Head-mounted display with electrochromic dimming module for augmented and virtual reality perception / С. Bell. — Оpubл. 25.02.2016.

## Holographic optical elements in virtual reality devices

*A. N. Putilin<sup>1</sup>, A. V. Morozov<sup>2</sup>, V. V. Druzhin<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Samsung Research Center, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The article concerns the analysis of the application of holographic optical elements in virtual display (VR) schemes, in particular, in head mounted display (HMD) and embedded head-up displays (HUD). Various types of holograms are considered, they can be used as an optical beam combiners, illumination elements for LCD and LCOS displays, as well as elements for distortions compensation and image transforming in the augmented reality (AR) display circuits.

**Keywords:** Holographic optical elements, HMD, HUD, Waveguide holography, Augmented Reality displays.

## 1.10. Аэросъемка религиозных памятников в Санкт-Петербурге

*Алкис Лембессис*

Греческий институт голографии (ГИГ), Афины, Греция

Университет ИТМО в сотрудничестве и при технической поддержке Греческого института голографии (НИН) участвовали в создании цифровых голографических отпечатков на основе аэрофотосъемки избранных церквей Санкт-Петербурга. Дроны, произведенные российской компанией GEOSCAN, получили необходимые лицензии и контракт, чтобы обогнуть две церкви в Санкт-Петербурге и получить фотографии и видеозаписи с высоким разрешением по строгим геометриям траектории полета, рассчитанным и указанным НИН. Полученный материал использовался для трехмерного компьютерного моделирования двух памятников, а также местного производства широкоформатных трехмерных линзовидных отпечатков и цифровых голографических отпечатков GEOLA (Литва). Эти 3D-отпечатки были представлены на различных мероприятиях Университетом ИТМО, включая семинар, посвященный голографии, организованный в Эрмитаже в рамках ежемесячного семинара Art & Science. Участники HOLOEXPO 2017 узнают о деталях проекта и оценят произведенные 3D-образцы.

### **Aerial views of religious monuments of Saint Petersburg**

*A. Lembessis*

Hellenic Institute of Holography (НИН), Athens, Greece

ITMO University in cooperation with the City of St. Petersburg and the technical support of the Hellenic Institute of Holography (HiH) have been involved in the creation of digital holographic prints based on aerial footage of selected Churches of St. Petersburg. Drones made by Russian company GEOSCAN have obtained the necessary licenses and contract to overfly two churches in the city of St. Petersburg and obtain high-resolution photographic and video footage following strict flight-path geometries calculated and specified by HiH. The resulting material has been used for 3D computer modelling of the two monuments as well as the local manufacture of large-format back-lit 3D-lenticular prints and digital holographic prints by GEOLA (Lithuania). These 3D-prints have been exhibited in various events by ITMO University including the session dedicated to Holography organized at the Hermitage Museum as part of the Art & Science monthly seminar. The participants of HOLOEXPO 2017 will learn of the project details and appreciate the produced 3D-samples.

### 1.11. Матричные фотоприемники в цифровых голографии и голографической интерферометрии

Г. И. Грейсх, Е. Г. Ежов, С. В. Казин, С. А. Степанов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия.

Представлен анализ отклика матричного фотоприемника на синусоидальный пространственный сигнал. Анализ выполнен методом прямой оценки энергии, падающей на каждый пиксел фоточувствительной матрицы, и учтено влияние пространственного сдвига сигнала относительно решетки элементов матрицы. Сформулированы рекомендации по выбору разрешения матричного фотоприемника в зависимости от максимальной пространственной частоты в регистрируемой интерференционной картине.

**Ключевые слова:** Матричный фотоприемник, Синусоидальный пространственный сигнал, Интерференционная картина, Пространственная частота, Частотно-контрастная характеристика.

Новые широкие возможности регистрации и обработки оптического изображения, открывшиеся благодаря переходу от галогенидосеребряных фотоэмульсий к полупроводниковым матричным фотоприемникам, стимулировали интерес к их использованию и в областях, предусматривающих регистрацию интерференционных картин, таких как цифровые голография и голографическая интерферометрия. Однако особенности матричных фотоприемников и, прежде всего, строгая пространственная периодичность и конечность размеров светочувствительных элементов (пикселей) требует согласования разрешения фотоприемника и максимальной пространственной частоты в регистрируемой картине.

В соответствии с теоремой отсчетов Котельникова-Шеннона разрешение матричного фотоприемника характеризуется его частотой Найквиста [1]

$$N_N = 1/(2\Lambda), \quad (1)$$

где  $\Lambda$  — пространственный период следования элементов матрицы, практически совпадающий с их размером.

Данное идеализированное представление о дискретизации и восстановлении непрерывных изображений предполагает использование биполярной интерполирующей sinc-функции. В случае матричного фотоприемника интерполирующая функция однополярна, т. к. ею является функция чувствительности пикселя. В результате отличия реальной интерполирующей функции от sinc-функции в изображении гармонического сигнала возникают биения и пространственно-зависимые изменения характеристик изображения [2].

Зависимость контраста, с которым тот или иной прибор воспроизводит поданный на него синусоидальный сигнал, представляет собой частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) этого прибора. Приведем выражение для ЧКХ матричного фотоприемника, исходя, как и в работе [3], из того, что передаточная функция прибора является Фурье-образом его импульсного отклика.

Отклик пикселя матрицы на импульс Дирака (в нашем случае точечный источник света) определяется функцией чувствительности пикселя. Пренебрегая зависимостью чувствительности от пространственной координаты точечного источника в пределах пикселя, а

также возможным перекрытием функций чувствительности соседних пикселей, будем считать функцию чувствительности пикселя прямоугольной. Фурье-образом прямоугольной функции шириной  $\Lambda$  является функция

$$T(N) = \text{sinc}(\Lambda N) \quad (2)$$

с первым нулем на частоте  $N = 1/\Lambda$ . В результате на частоте Найквиста контраст

$$T(N_N) = \text{sinc}(\Lambda N_N) = 0,63662 \approx 0,64. \quad (3)$$

Выражение (2) для контраста не учитывает пространственный сдвиг синусоидального сигнала относительно решетки элементов матрицы  $\Lambda_0$ , который, практически с равной вероятностью, может принимать любые значения в диапазоне  $\pm\Lambda$ . В работах [4–6] был предложен метод учета влияния  $\Lambda_0$  на отклик матричного фотоприемника на синусоидальный пространственный сигнал. В настоящем же докладе приведены результаты анализа этого влияния и рекомендации по выбору разрешения матричного фотоприемника в зависимости от максимальной пространственной частоты в регистрируемой интерференционной картине [7].

Следуя работам [4–6], рассмотрим зависимость контраста при воспроизведении строкой матрицы синусоидального пространственного сигнала от его частоты  $N$ . Представим сигнал в виде

$$I(x) = 0,5[1 + Q \cos(2\pi Nx)], \quad (4)$$

где  $0 \leq Q \leq 1$  — коэффициент модуляции, а  $x$  — координата вдоль строки.

Связав пространственную частоту сигнала и период матрицы через коэффициент  $a$  соотношением  $N = 1/(a\Lambda)$ , определим энергию, приходящуюся на два ближайших элемента матрицы, имеющих наибольшую и наименьшую освещенность:

$$E_j = \int_{(j-1)\Lambda+\Lambda_0}^{j\Lambda+\Lambda_0} I(x) dx \quad (5)$$

и

$$E_k = \int_{(k-1)\Lambda+\Lambda_0}^{k\Lambda+\Lambda_0} I(x) dx, \quad (6)$$

где  $j$  и  $k$  — номера элементов с максимальной и минимальной освещенностями, соответственно.

Произведя интегрирование, получаем

$$E_j = 0,5\Lambda \left[ 1 + \frac{Qa}{\pi} \cos\left(\frac{\pi((2j-1)\Lambda + 2\Lambda_0)}{a\Lambda}\right) \sin\frac{\pi}{a} \right], \quad (7)$$

$$E_k = 0,5\Lambda \left[ 1 + \frac{Qa}{\pi} \cos\left(\frac{\pi((2k-1)\Lambda + 2\Lambda_0)}{a\Lambda}\right) \sin\frac{\pi}{a} \right]. \quad (8)$$

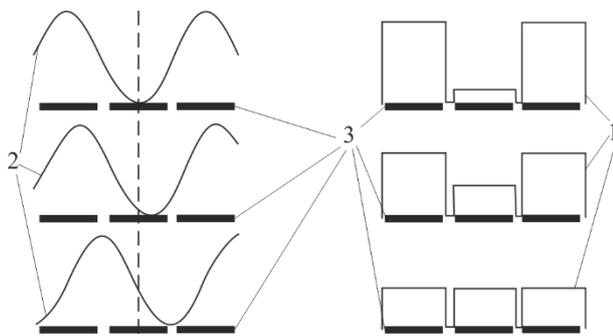
Контраст изображения может быть найден по формуле

$$T = \frac{E_j - E_k}{E_j + E_k}. \quad (9)$$

Используя соотношения (7) — (9), легко показать, что при  $Q = 1$  значение контраста на частоте следования пикселей  $2N_N = 1/\Lambda$  тождественно (независимо от значения  $\Lambda_0$ ) равно нулю, а на частоте Найквиста (т. е. при  $a = 2$ ) колеблется в промежутке  $0 \leq T \leq 0,64$  в зависимости от значения  $\Lambda_0$  (0 при  $\Lambda_0 = 0$  и 0,64 при  $\Lambda_0 = \pm 0,5\Lambda$ , рисунок 1). Сразу же отметим, что только максимальное значение контраста на частоте Найквиста совпадает со значением, даваемым формулой (3). С увеличением  $a$  относительный перепад контраста уменьшается. Так при  $a = 3$  ( $N = 0,67N_N$ ) контраст изменяется в пределах  $0,51 \leq T \leq 0,78$  (0,51 при  $\Lambda_0 = \pm 0,5\Lambda$  и 0,78 при  $\Lambda_0 = 0$ ), при  $a = 4$  ( $N = 0,5N_N$ ) — в пределах  $0,64 \leq T \leq 0,9$  (0,64 при  $\Lambda_0 = 0$  и 0,9 при  $\Lambda_0 = \pm 0,5\Lambda$ ) и, наконец, при  $a = 8$  ( $N = 0,25N_N$ ) — в пределах  $0,9 \leq T \leq 0,98$  (0,9 при  $\Lambda_0 = 0$  и 0,98 при  $\Lambda_0 = \pm 0,5\Lambda$ ).

Таким образом, выражение (2) не отражает зависимость контраста от пространственного сдвига синусоидального сигнала относительно решетки элементов матрицы, в то время как изложенный выше метод прямой оценки энергии, падающей на каждый пиксел фоточувствительной матрицы, позволяет увидеть, как искажается синусоидальный пространственный сигнал матричным фотоприемником.

Все виды возникающих искажений можно разделить на четыре основные группы [7]:



1 — отклик матричного фотоприемника; 2 — синусоидальный пространственный сигнал; 3 — пиксели матрицы  
Рис. 1. Отклик матричного фотоприемника на синусоидальный пространственный сигнал при  $N = N_N = 1/(2\Lambda)$

— падение контраста при постоянном среднем уровне сигнала и без низкочастотной модуляции (рисунок 2а);

— изменяющийся по строке контраст вследствие низкочастотной амплитудной модуляции (рисунок 2б);

— практически постоянный по строке контраст, но изменяющийся по синусоидальному закону средний уровень сигнала  $\bar{L}$  (рисунок 2в);

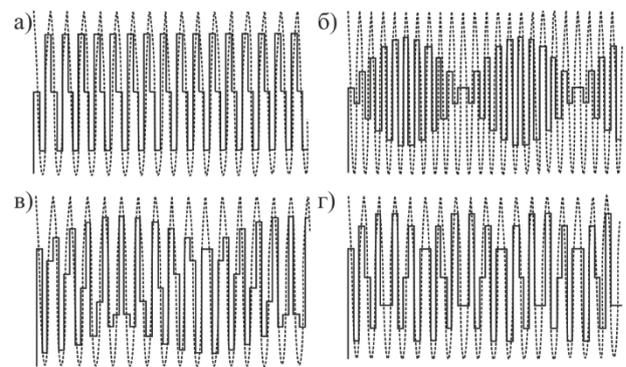
— одновременно изменяющийся по строке контраст и средний уровень сигнала (рисунок 2г). Искажения такого вида в популярной фотографической литературе называют лабиринтами [8].

Представленный анализ показывает, что искажения отклика матричного фотоприемника практически отсутствуют независимо от пространственного сдвига синусоидального сигнала относительно решетки элементов матрицы лишь при  $N \leq 1/(8\Lambda)$  ( $N \leq 0,25N_N$ ).

Если же  $N \geq 1/(4\Lambda)$  ( $N \geq 0,5N_N$ ), то искажения дискретизации начинают негативно сказываться на качестве изображения, причем кроме падения контраста возможны и паразитная низкочастотная модуляция, и изменения среднего уровня сигнала, наблюдаемые как муар или плавные паразитные изменения яркости в изображении.

Зависимость контраста от соотношения пространственных частот и сдвига сигнала относительно решетки элементов матрицы исследована также при определении предельной разрешающей способности оптико-электронных систем наблюдения вероятностным методом [2]. Результаты расчетов вероятности распознавания выбранных объектов показали её достаточную инвариантность к фазовому смещению мира относительно матрицы в случае, если  $N \leq 0,75N_N$ . Однако, резкое падение вероятности наблюдается уже при  $N \geq 0,5N_N$ .

Обобщая результаты, полученные методом прямой оценки энергии, падающей на каждый пиксел фоточувствительной матрицы, и вероятностным методом, в качестве необходимого условия достижения высокого качества следует потребовать ограничения спектра



а — при  $N = 1/(3\Lambda)$  и  $\Lambda_0 = 0,25$  ( $T = 0,72$ ); б — при  $N = 1/(2,1\Lambda)$  и  $\Lambda_0 = 0$  ( $0,10 \leq T \leq 0,66$ ); в — при  $N = 1/(3,1\Lambda)$  и  $\Lambda_0 = 0$  ( $0,70 \leq T \leq 0,79$ ), ( $0,50 \leq \bar{L} \leq 0,73$ ); г — при  $N = 1/(2,8\Lambda)$  и  $\Lambda_0 = 0$  ( $0,10 \leq T \leq 0,6$ ), ( $0,50 \leq \bar{L} \leq 0,70$ )

Рис. 2. Отклик матричного фотоприемника (—) на синусоидальный пространственный сигнал (- - -)

пространственных частот, в подаваемой на матричный фотоприемник интерференционной картине, величиной  $N_B = (0,25-0,5)N_N$ . При этом желательно, чтобы составляющие оптического сигнала с пространственными частотами  $N < N_B$  имели максимально возможный контраст.

#### Список источников

- [1] Папулис, А. Теория систем и преобразований в оптике / А. Папулис. — М.: Мир, 1971. — С. 93.
- [2] Королев, А. Н. Анализ и оптимизация информационных характеристик оптико-электронных систем наблюдения / А. Н. Королев, С. Л. Морозов, И. Н. Сивяков // Оптический Журнал. — 1995. — Том 62. — № 5. — С. 54–58.
- [3] Lenhardt, K. Optics for digital photography / K. Lenhardt // Proceedings of SPIE. — 2007. — Vol. 6834. — P. 68340W-1. — 18 p.
- [4] Грейсух, Г. И. Коррекция aberrаций градиентной иглообразной части жесткого эндоскопа, сопрягаемой с ПЗС-камерой / Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов // VI международная конференция «Прикладная оптика 2004»: сб. трудов. — СПб.: 2004. — Том. 3. — С. 88–91.
- [5] Ежов, Е. Г. Оценка качества тракта, состоящего из оптической системы и ПЗС-камеры / Е. Г. Ежов // II Всероссийская научно-техническая конференция «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов»: сб. статей. — Пенза: 2004. — С. 94–97.
- [6] Ежов, Е. Г. Применение дифракционных оптических элементов в информационных технологиях / Е. Г. Ежов // V Всероссийская научно-техническая конференция «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов»: сб. статей. — Пенза: 2007. — С. 113–116.
- [7] Грейсух, Г. И. Отклик матричного фотоприемника на составляющие оптического сигнала с различными пространственными частотами / Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, С. В. Казин, С. А. Степанов // Квантовая электроника. — 2017. — Том 47. — № 1. — С. 71–74.
- [8] Сенсоры цифровых камер / URL: <http://www.cambridgeincolour.com/ru/tutorials-ru/camera-sensors.htm>.

## The matrix photodetectors in digital holography and holographic interferometry

*G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, S. V. Kazin, S. A. Stepanov*

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

In the report, the response of the matrix photodetector to the sinusoidal spatial signal is analyzed. The analysis is performed by the method of direct estimation of the energy incident on each pixel of the photosensitive matrix. The influence of the spatial shift of the signal relative to the array of matrix elements is taken into account in the analysis. The recommendations on the choice of the resolution of the matrix photodetector depending on the maximum spatial frequency in the recorded interference pattern are formulated.

**Keywords:** Matrix photodetector, Sinusoidal spatial signal, Interference pattern, Spatial frequency, Modulation transfer function.

## 1.12. Голограммные элементы для систем космической оптики

*С. Н. Корешев*

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

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

Рассмотрено применение голограммных оптических элементов в оптических системах космического базирования. Особое внимание уделено датчику волнового фронта, работающему по голограммной структуре, нанесенной на поверхность главного зеркала космического телескопа. Приведены результаты сравнительного анализа чувствительности контроля формы зеркала, реализуемого из его геометрического центра кривизны и из эффективного центра кривизны, сформированного с помощью голограммной структуры. Описаны ключевые технологии нанесения голограммной структуры на поверхность главного зеркала телескопа. Рассмотрен реализуемый с помощью датчика волнового фронта метод виртуальной адаптации оптических систем. Приведены результаты его исследования, демонстрирующие его работоспособность и эффективность.

**Ключевые слова:** Голограммные оптические элементы, Оптико-электронный телескопический комплекс, Голограммная структура, Датчик волнового фронта, Метод виртуальной адаптации.

### Введение

Уникальность свойств и широкие возможности голограммных оптических элементов (ГОЭ) привлекают к себе внимание исследователей и разработчиков, занимающихся вопросами оптического приборостроения, в том числе и разработкой оптико-электронных телескопических комплексов (ОЭТК) космического базирования. Положительный эффект от использования таких элементов в комплексах космического базирования объясняется, во-первых, возможностью улучшения массогабаритных характеристик проектируемых оптико-электронных систем за счет способности ГОЭ одновременно выполнять функции нескольких, порой совершенно разнородных, традиционных оптических элементов. Во-вторых, использование голограммных элементов в ОЭТК позволяет расширить круг решаемых ими задач за счет улучшения таких технических характеристик оптико-электронных систем как: разрешающая способность, поле зрения, число спектральных полос и т. д.

### 1. Голограммные оптические элементы в оптико-электронных комплексах космического базирования

В опубликованных концепциях ОЭТК голограммные оптические элементы предлагается использовать в качестве ключевых элементов служебных подсистем, например, датчика волнового фронта, либо в качестве корректоров аберраций информационного канала ОЭТК, обусловленных дефектами сборки или динамическими деформациями оптических элементов телескопов, например, его зеркал. Помимо этого, ГОЭ могут применяться в качестве сканирующих объективов лазерных лидаров, а также в качестве компенсаторов аберраций нормалей при технологическом и выходном контроле качества асферических зеркал, входящих в состав объективов ОЭТК.

В России и за рубежом в части разработки и исследования ГОЭ для ОЭТК получен ряд интересных результатов, как в области принципиальных технологических и приборостроительных технических реше-

ний, так и в области создания конкретных типов оптико-электронных лазерных систем с элементами голограммной оптики. Они позволяют значительно приблизиться к созданию ключевых технологий изготовления ГОЭ, а также расширить спектр возможных применений голограммных оптических элементов в информационных оптико-электронных системах и, как следствие этого, обуславливающих возможность создания новых типов ОЭТК с улучшенными тактико-техническими характеристиками. Кроме того, работа над проектами крупногабаритных телескопических комплексов внеатмосферного базирования дала толчок к разработке новых технологий, в том числе и голографических технологий, которые могут или уже используются в других областях науки и техники. Круг голограммных оптических элементов, разработанных специально для систем космической оптики, практически ограничен объективами для лидаров и главными зеркалами телескопов, обладающими двумя эффективными радиусами кривизны. Говоря о лидарах нельзя не отметить разработанные и испытанные специалистами NASA и University of Maryland лидарные оптико-электронные системы с главным зеркалом, выполненным в виде ГОЭ [1]. Они были построены на базе отражательного спектрально селективного ГОЭ диаметром 450 мм с дифракционной эффективностью 85 % и предназначались для работы на длине волны 0,532 мкм при спектральной ширине по уровню 0,5–0,05 мкм. Принципиальная схема подобного лидара представлена на рисунке 1. По мнению разработчиков лидаров основные преимущества систем с ГОЭ заключаются в их компактности, малых массах, простоте организации кругового сканирования исследуемого пространства путем вращения неосесимметричного ГОЭ, а также в низкой, по сравнению с традиционными аналогами, стоимости. Дальнейшее совершенствование лидаров с ГОЭ, по мнению специалистов NASA, будет идти по пути организации сканирования пространства за счет выполнения объектива в виде мультиплексной наложенной голограммы, состоящей из нескольких элементарных голограмм, каждая из которых обеспечивает

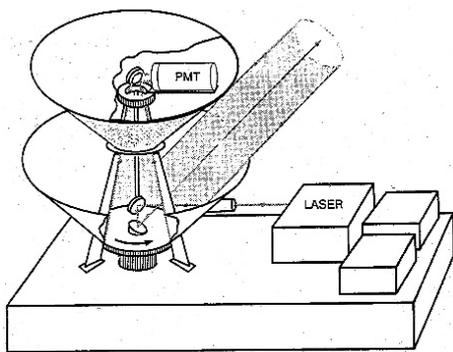


Рис. 1. Принципиальная схема лидара с ГОЭ

прием отраженного сигнала в пределах своего участка общего поля зрения.

Рельефно-фазовые голограммные структуры, нанесенные в виде локальных пятен на главное зеркало, — таковы ключевые элементы системы фазировки сегментированного 6 метрового адаптивного главного зеркала с разряженной апертурой полярного «внеатмосферного» телескопа POST [2]. Предложенная ими система контроля и управления взаимного расположения сегментов составного зеркала основана на использовании голограммных структур, нанесенных, по крайней мере, на трех пространственно разделенных участках каждого сегмента главного зеркала телескопа. К подобным устройствам можно отнести разработанную в рамках американской программы звездных войн систему формирования и управления лазерным излучением в космосе.

В этой системе в качестве ключевого элемента тракта считывания информации о форме поверхности главного зеркала также предполагалось использовать нанесенную на его поверхность голограммную структуру. Ее так же, как и в предыдущем проекте, предлагалось наносить локальными пространственно разделенными пятнами. Аналогичные работы, в том или ином виде, проводились и в России. Рассмотрим результаты некоторых из них.

## 2. Голографический датчик волнового фронта

Начнем с разработки одной из возможных реализаций датчика волнового фронта, предназначенной для

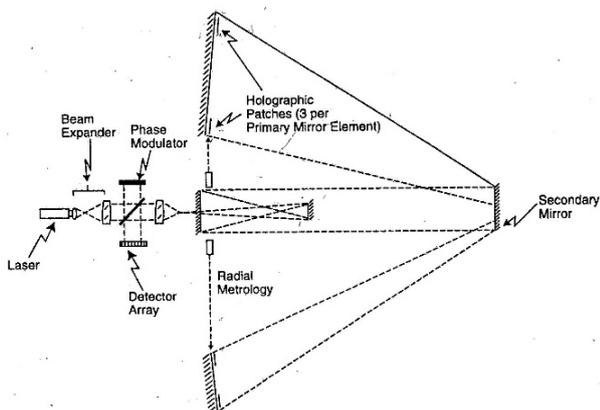


Рис. 2. Принципиальная схема полярного телескопа POST

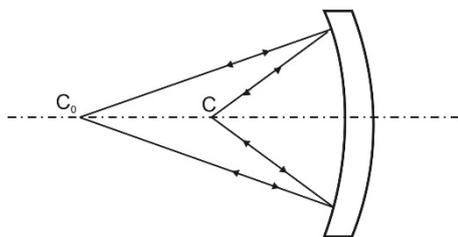


Рис. 3. Рельефно-фазовый ГОЭ — зеркало с двумя эффективными центрами кривизны

работы в составе космического телескопа и основанной на использовании внутреннего лазерного источника излучения и рельефно фазовой голограммной структуры, нанесенной на поверхность главного зеркала телескопа [3]. Используемое в датчике зеркало, несущее на своей поверхности рельефно-фазовую голограммную структуру, представляет собой полифункциональный отражательный ГОЭ, близкий по своим изображающим свойствам к зеркалу с двумя эффективными центрами кривизны (рисунок 3). Один из них  $C_0$  реализуется в нулевом порядке дифракции излучения на голограммной структуре и совпадает по положению с центром кривизны поверхности зеркала.

Положение второго эффективного центра кривизны  $C$  зависит от изображающих свойств голограммной структуры и может быть определено исходя из известного принципа полифункциональности отражательных рельефно-фазовых голограммных оптических элементов. Таким образом, представленный на рисунке 3 отражательный рельефно-фазовый ГОЭ, обладающий эффективным центром кривизны, расположенным в фокальной плоскости поверхности подложки, может быть описан следующей эквивалентной оптической схемой (рисунок 4). На этом рисунке  $\Gamma$  — пропускающая голограмма, аналогичная по структуре металлизированной отражательной,  $\mathcal{Z}$  — расположенное непосредственно за ней обычное сферическое зеркало. При освещении голограммы из точки  $C_1$ , расположенной в фокальной плоскости зеркала  $\mathcal{Z}$ , она, в первом порядке дифракции, формирует близкий к параллельному пучок лучей. Последний направляется на зеркало  $\mathcal{Z}$ , отражается от него, проходит через голограмму в нулевом порядке дифракции и фокусируется в точке  $C_1$ .

На рисунке 5 представлена блок-схема контрольного канала телескопа, содержащего голографический

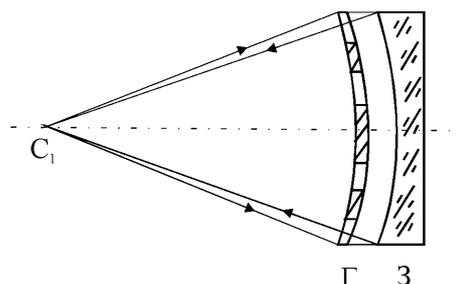


Рис. 4. Эквивалентная схема рельефно-фазового ГОЭ в первом порядке дифракции

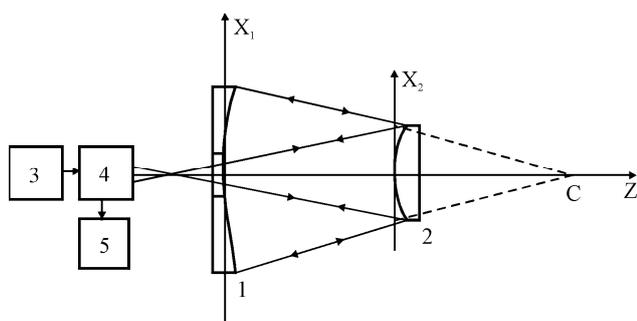


Рис. 5. Блок-схема контрольного канала телескопа

датчик волнового фронта. Она включает в себя: главное зеркало с голограммной структурой 1, вторичное зеркало 2, лазерный источник 3, акустооптический частотный модулятор 4, гетеродинный интерферометр с узким опорным пучком и фоторегистрирующий блок 5. На этом же рисунке обозначены:  $C'$  — точечный источник монохроматического излучения, падающего на вторичное зеркало,  $C$  — мнимое изображение источника  $C'$ , построенное зеркалом 2 и расположенное в эффективном «центре кривизны» главного зеркала с голограммной структурой. Пучок лучей, расходящийся из точки  $C$ , падает на зеркало 1, преобразуется его поверхностью и голограммной структурой в пучок лучей, сходящийся в автоколлимационные точки главного зеркала  $C$  и  $C'$ .

Информация о деформациях формы главного зеркала считывается с помощью датчика волнового фронта, в который и поступает указанный пучок лучей после отражения от зеркал 1 и 2.

### 3. Разработка основ технологического процесса нанесения голограммной структуры на главное зеркало ОЭТК

Необходимость разработки специализированной технологии нанесения голограммной структуры на поверхность главного зеркала ОЭТК объяснялась совокупностью предъявляемых к такому зеркалу требований. Среди них: малый уровень aberrаций, вносимых в контрольный и информационный каналы телескопа, не превышающая 1% дифракционная эффективность и минимальное влияние голограммной структуры на информационный канал. Кроме того, немаловажными являются требования необходимости переноса голограммной структуры в материал подложки зеркала и пригодность технологии к нанесению структуры на зеркало большого диаметра. Проведенные исследования показали, что минимальное влияние на информационный канал телескопа при требуемой дифракционной эффективности структуры будет иметь место при выполнении следующих основных требований. Во-первых, форма профиля голограммной структуры, с точки зрения, как внесения aberrаций из-за ее неизбежных вариаций, также как и с точки зрения потерь энергии в информационном канале, должна быть симметричной, близкой к синусоидальной, либо треугольной и должна

характеризоваться величиной скважности, равной 0,5. Поскольку лишь в этом случае при минимальных потерях энергии в информационном канале вариации высоты и формы профиля рельефа вносят одинаковые по знаку и величине aberrации в контрольный и информационный каналы телескопа. Во-вторых, допустимый диапазон вариаций дифракционной эффективности, а, следовательно, и допустимый диапазон вариаций высоты и формы профиля рельефа голограммной структуры должен задаваться исходя из допустимых для обоих каналов телескопа величин aberrаций.

Необходимость адаптации технологии нанесения голограммной структуры на поверхности крупногабаритных зеркал космических телескопов обусловили выбор регистрирующей среды, в качестве которой было предложено использовать тонкие, толщиной 1 мкм и менее, слои галогеносеребряной фотоэмульсии, химико-фотографическая обработка которых осуществлялась методом избирательного дубления. При этом возникала необходимость решения следующих основных технологических задач. Во-первых, было необходимо разработать технологию формирования слоев фотоэмульсии равной толщины на криволинейные подложки большого размера, диаметром до 1 м при допусках на вариации толщины, не превышающие 0,1 длины волны записи голограммной структуры. Во-вторых, необходима была технология переноса рельефной голограммной структуры в материал подложки зеркала, основанная на использовании метода ионного травления. Проведенные исследования показали пригодность использования метода центрифугирования для нанесения тонких слоев фотоэмульсии на крупногабаритные подложки. В ходе экспериментов, проведенных на подложках диаметром 150 мм, были подобраны температура, вязкость фотоэмульсии и скорость вращения центрифуги, обеспечивающие получение на подложке слоя фотоэмульсии толщиной в 1 мкм с требуемой степенью равномерности. Химико-фотографическая обработка экспонированных слоев фотоэмульсии осуществлялась, как это было указано выше, методом избирательного дубления желатины. Отметим, что голограммы, полученные таким методом на тонких слоях галогеносеребряной фотоэмульсии, были столь прочны, что практически не разрушались даже при помещении голограммы в кипяток. Кроме того, полученные таким образом рельефные структуры обладали заметной стойкостью к воздействию ионных пучков и могли быть использованы в качестве маски при переносе рельефа в материал подложки — плавленный кварц методом ионного травления, как в среде азота, так и в среде фреона. При оптимальных параметрах травления коэффициент переноса лежал в пределах от 3 до 5, т. е. высота рельефа в кварце составляла 0,2–0,3 высоты рельефа голограммной структуры на фотоэмульсии. Эмпирически полученная зависимость коэффициента переноса рельефа от параметров голограммной структуры имеет вид:

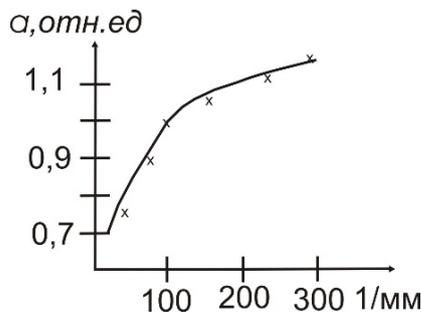


Рис. 6. График функции, описывающей зависимость коэффициента переноса высоты рельефа от пространственной частоты голограммной структуры, соответствующий травлению в среде фреона

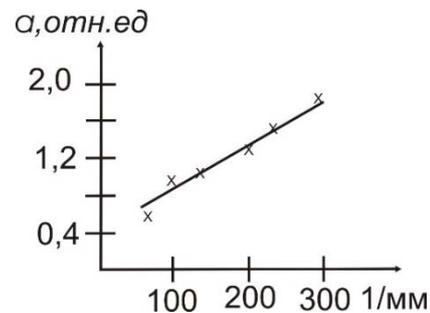


Рис. 7. График функции, описывающей зависимость коэффициента переноса высоты рельефа от пространственной частоты голограммной структуры, соответствующий травлению в аргоне

$$k = \frac{h_{sl}}{h_{sl}} \approx [0,154T + 0,07(1 + \lg 10E)]\alpha(\nu), \quad (2)$$

Здесь  $T$  — исходная толщина слоя с голограммной структурой в мкм,  $E$  — экспозиция, выраженная в Дж/см<sup>2</sup>,  $\alpha(\nu)$  — функция, описывающая зависимость коэффициента переноса высоты рельефа от среды, в которой осуществлялось травление, и от пространственной частоты голограммной структуры, т. е. от степени задубленности носителя голограммы. Для величины тока разряда 60 мА, ускоряющего напряжения 4 кВ и тока соленоида 1,7 А графики функции  $\alpha(\nu)$  для случаев травления в аргоне и фреоне имеют вид, представленный на рисунках 6 и 7, соответственно. Требование практического отсутствия aberrаций в контрольном канале телескопа при недеформированном главном зеркале обусловило необходимость разработки методики расчета схем записи голограммной структуры. Данная методика учитывает конкретную, в том числе и асферическую, форму главного и вторичного зеркал телескопа и предназначена для определения как геометрических параметров схем регистрации голограммной структуры, так и допустимых вариаций величин этих параметров.

Проведенный с ее помощью теоретический анализ влияния конструктивных параметров телескопа, в частности формы и взаимного расположения его главного и вторичного зеркал, на геометрические параметры принципиальной схемы записи голограммной структуры позволил выявить и сформулировать следующие основные положения [4–6]:

1. Введение в конструкцию телескопа возможности юстировочного смещения автоколлимационной точки датчика волнового фронта вдоль оптической оси главного зеркала телескопа позволяет, по крайней мере, на два порядка, расширить допуски на продольные смещения опорного и объектного источников схемы записи голограммной структуры.

2. Допустимые деформации поверхности главного зеркала вдоль его оптической оси в процессе регистрации голограммной структуры существенно, вплоть до нескольких порядков, в зависимости от конкретных схем телескопов, превышают по величине точность измерения формы поверхности зеркала, реализуемую

датчиком волнового фронта с помощью записанной таким образом голограммной структуры.

3. Увеличение рабочей длины волны датчика волнового фронта по сравнению с длиной волны записи голограммной структуры при прочих равных условиях приводит к уменьшению требуемых габаритов стнда регистрации указанной структуры.

Проиллюстрируем последнее положение с помощью графиков, приведенных на рисунке 8. По оси ординат на нем отложены значения параметра  $\mu$ , описывающего отношение длин волн регистрации и восстановления голограммной структуры, а по оси абсцисс выраженные в величинах радиуса кривизны главного зеркала телескопа расстояния от вершины главного зеркала до опорного  $R$  и объектного  $O$  источников. Из приведенных кривых видно, что выбор рабочей длины волны контрольного канала телескопа оказывает существенное влияние на размеры стнда записи голограммной структуры. Так, использование в контрольном канале телескопа излучения ближнего инфракрасного диапазона — 1,06 мкм вместо традиционно предлагаемого для этой цели излучения видимого диапазона позволяет более, чем в 4 раза сократить длину стнда записи голограммной структуры при сохранении необходимой точности контроля формы главного зеркала.

Важным моментом разработки схемы записи голограммной структуры является расчет допустимых деформаций формы поверхности главного зеркала на момент регистрации голограммной структуры. Знание величины этих деформаций позволяет сделать вывод о целесообразности или нецелесообразности фазировки зеркала, которое может быть составным либо гибким, на момент регистрации голограммной структуры. В результате проведенного нами теоретического анализа влияния деформации главного зеркала при записи голограммной структуры на качество поступающего в интерферометр волнового фронта были получены аналитические выражения, позволяющие провести оценку величин допустимых деформаций поверхности зеркала. Результаты их анализа свидетельствуют о необходимости строгой фиксации субапертур, либо участков поверхности зеркала перед регистрацией голограммной структуры вдоль поверхности зеркала и о

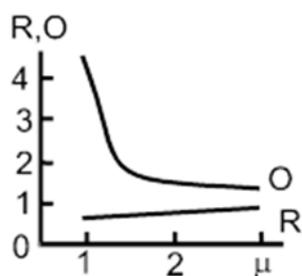


Рис. 8. Графики зависимости параметров  $R$  и  $O$  от отношения длины волны контрольного канала к длине волны записи голограммной структуры

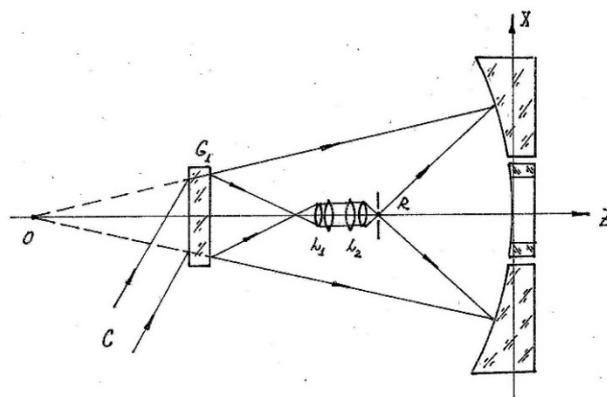


Рис. 9. Принципиальная схема стандартизации голограммной структуры

довольно свободных допусках на установку субапертур вдоль его оптической оси. Отметим, что эти допуски, превышающие примерно на два порядка требуемую точность интерференционного контроля формы поверхности главного зеркала, могут быть, в принципе, выдержаны с помощью таких средств контроля положений субапертур, как часовые индикаторы, и не требуют использования интерферометров для их реализации.

Большая площадь главного зеркала телескопа и относительно большая длительность экспонирования привели к необходимости разработки специализированного стенда записи, обеспечивающего возможность последовательной записи голограммной структуры [7]. Его принципиальная схема представлена на рисунке 9. Здесь  $G_1$  — вспомогательная голограмма, выполненная за две экспозиции и формирующая гомоцентрические расходящийся объектный и сходящийся опорный

пучки лучей. Оптическая система  $L_1 — L_2$  служит для согласования апертур опорного и объектного пучков лучей. Возможность последовательной регистрации голограммной структуры в рассматриваемом стенде обеспечивается параллельным переносом узкого коллимированного пучка по поверхности вспомогательного ГОЭ. Это позволяет значительно уменьшить время экспонирования каждой из последовательно регистрируемых областей голограммной структуры и использовать для записи ГОЭ регистрирующие среды с относительно низкой светочувствительностью.

Разработанные и описанные выше технические и технологические решения были использованы при изготовлении 150 мм макета зеркала с рельефно фазовой голограммной структурой. Основные характеристики зеркала представлены в таблице 1.

Качество пучка, формируемого зеркалом с голограммной структурой в первом порядке дифракции, иллюстрирует интерферограмма, приведенная на рисунке 10.

Таблица 1. Технические характеристики

Параметр	Значение
Диаметр	150 мм
Радиус кривизны поверхности зеркала	3020 мм
Эффективный радиус кривизны элемента в первом порядке дифракции на длине волны 0,63 мкм	1720 мм
Фокусное расстояние голограммной структуры в первом порядке дифракции на длине волны 1,06 мкм	1200 мм
Дифракционная эффективность в первом порядке дифракции на длине волны 1,06 мкм	14 %
Дифракционная эффективность в нулевом порядке дифракции	55 %
Волновая aberrация пучка, формируемого голограммной структурой в первом порядке дифракции на $\lambda = 0,63$ мкм	$< 0,3 \lambda$

#### 4. Метод виртуальной адаптации

Основная трудность в реализации традиционных ОЭТК состоит в необходимости оснащения телескопа большим количеством сложных и недостаточно надежных в эксплуатации прецизионных приводов и громоздких энергоемких систем управления ими. В связи с этим весьма перспективным представляется путь построения таких систем, основанный на применении, так называемого, метода виртуальной адаптации [8]. Его суть состоит в использовании рассмотренного выше датчика волнового фронта, работающего по голограммной структуре. Полученная с его помощью информация о возмущениях, вносимых оптическим трактом телескопа, поступает в бортовой вычислительный комплекс. С помощью последнего осуществляется расчет текущего импульсного отклика оптического тракта телескопа, и вносятся необходимые коррективы в формируемые с его помощью изображения. Отметим, что знание текущего импульсного отклика оптического тракта телескопа позволяет реализовать метод виртуальной адаптации оптических систем в реальном мас-



Рис. 10. Интерферограмма, характеризующая качество сформированного пучка лучей

штабе времени. В качестве основных факторов, ограничивающих предельные возможности метода виртуальной адаптации, можно назвать ошибки измерения искажений волнового фронта, определяющие точность расчета реально реализуемого импульсного отклика оптического тракта ОЭТК, и наличие шумов фотоприемного устройства, приводящих к безвозвратной потере информации о деталях структуры сформированного изображения. В результате исследования метода виртуальной адаптации, проведенного путем компьютерной симуляции, было установлено, что даже при относительно невысоком отношении сигнал/шум (200/20) и максимальном из рассмотренных искажений — дефокусировке в  $0,5\lambda$ , вероятное разрешение при использовании метода виртуальной адаптации приблизительно равно уровню разрешения, реализуемого в ОЭТК в случае отсутствия возмущений в его оптическом тракте. Следовательно, метод виртуальной адаптации позволяет достигать уровень качества изображения, в ряде случаев, превышающий уровень качества изображения, реализуемого ОЭТК в отсутствие фазовых возмущений в оптическом тракте. Кроме того, полученные данные свидетельствуют о том, что ошибки датчика волнового фронта, а, следовательно, и ошибки в определении ФПМ приводят, в общем случае, к уменьшению величины обеспечиваемого ОЭТК вероятного разрешения. Величина этого уменьшения зависит не только от величины ошибки датчика, но и,

во многом, определяется величинами фазовых возмущений и реализуемой величиной отношения сигнал/шум. Так при рассмотренных в настоящей работе величинах фазовых возмущений  $\leq 0,5\lambda_c$  и отношениях сигнал/шум  $\geq 200/20$  типичная для голографического датчика волнового фронта суммарная среднеквадратичная ошибка, определенная выше величиной в  $0,07\lambda$ , обусловит лишь незначительное, равное  $3-4 \text{ мм}^{-1}$ , уменьшение вероятной разрешающей способности ОЭТК.

### Заключение

Приведенные в настоящей работе результаты исследования получены, в основном, в годы активного развития оптических систем космического базирования. Их ценность и актуальность для настоящего времени объясняется, в первую очередь, совокупностью разработанных в то время новых голографических технологий, которые могут и явно будут востребованы в современной жизни. Это особенно важно на современном этапе развития техники, характеризующемся практически полным отказом от этапа научно-исследовательских работ при создании новой техники. Поскольку практически все описанные в настоящей работе технологии и методы уникальны и не были повторены кем-либо еще, они вполне успешно могут быть использованы при проведении новых опытно-конструкторских работ, направленных на создание современных оптических систем с ГОЭ.

### Список источников

- [1] Schwemmer, G. NASA lidar uses HOEs for lightweight scanning / G. Schwemmer, T. Wilkerson, D. Guerra, R. Rallison // Laser Focus World. — 2002. — Vol. 38. — № 6. — P. 145.
- [2] Ford, H. POST: A Polar Stratospheric Telescope / H. Ford, P. Bely, J. Bally et al. // Proceedings of SPIE. — Vol. 2199. — P. 298–314.
- [3] Зуев, В. С. Анализ возможности лазерного интерференционного контроля поверхности зеркала оптического телескопа / В. С. Зуев, Е. П. Орлов, В. А. Сауткин // Квантовая электроника. — 1975. — Том 2. — № 1. — С. 78–98.
- [4] Корешев, С. Н. Основы голографии и голограммной оптики: учебное пособие / С. Н. Корешев. — М-во образования и науки РФ; Университет ИТМО, [Каф. ПиКО]. — СПб.: Университет ИТМО, 2016. — С. 104.
- [5] Корешев, С. Н. О построении схем записи голограммной структуры на поверхности главного зеркала адаптивного телескопа и о требованиях, предъявляемых к их геометрическим параметрам / С. Н. Корешев // Оптика и спектроскопия. — 1994. — Том 76. — № 1. — С. 109–115.
- [6] Корешев, С. Н. Анализ возможных вариантов построения принципиальной схемы записи голограммной структуры на поверхности главного зеркала адаптивного телескопа / С. Н. Корешев // Оптический журнал. — 1995. — № 10. — С. 46–54.
- [7] Корешев, С. Н. Особенности формирования интерференционного поля для регистрации голограммных структур на поверхностях крупногабаритных зеркал адаптивного телескопа / С. Н. Корешев, В. С. Образцов, М. В. Тютчев // Оптический журнал. — 1995. — № 10. — С. 55–57.
- [8] Корешев, С. Н. Сравнительный анализ эффективности методов адаптации наблюдательных внеатмосферных систем / С. Н. Корешев, Ю. А. Ванюшкин, И. Н. Сивяков // Оптический журнал. — 2001. — Том 68. — № 12. — С. 5–10.

## Hologram optical elements for space-based optics

*S. N. Koreshev*

Saint-Petersburg national research University of information technologies, mechanics and optics, Saint Petersburg, Russia

S. I. Vavilov State optical Institute, Saint Petersburg, Russia

The use of holographic optical elements in space-based optical systems is considered. Special attention is given to the wave front sensor working on holographic structure deposited on the surface of the primary mirror. The results of comparative analysis of the accuracy of mirror shape testing realized from the geometrical center of curvature of the mirror and from the effective center of curvature formed holographic structure is presented. The key technologies of applying the hologram structures on the surface of the main mirror are described. The method for virtual adaptation of optical systems based on wave front sensor using is considered. The results of his research, demonstrate its performance and efficiency.

**Keywords:** Holographic optical elements, Optoelectronic telescope complex, Holographic structure, Wave front sensor, Method for virtual adaptation.

### 1.13. Изображающие системы на основе гармонических линз с кольцевой апертурой

*Р. В. Скиданов<sup>1</sup>, А. А. Морозов<sup>1</sup>, С. В. Ганчевская<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений Российской академии наук — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, Самара, Россия

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Рассмотрена конструкция компактного изображающего объектива из на основе отражающей кольцевой гармонической линзы. Показано, что в этом случае возможно создание высококачественного изображающего объектива.

**Ключевые слова:** Гармоническая линза, Изображающая система, Объектив.

#### Введение

Дифракционные линзы очень удобны для систем формирования изображения. Высокий хроматизм дифракционных линз [1], возможно компенсировать путем использования, так называемых гармонических линз [2, 3]. Изображающие системы на основе гармонических линз позволяют существенно уменьшить массу объектива, поскольку толщина гармонической линзы — это толщина подложки, на которой нанесен микрорельеф. Однако существенно уменьшить геометрические размеры, например, телескопического объектива, не получится, для этого нужно принципиально иное техническое решение. В настоящей работе рассматривается изображающая система, состоящая из двух зеркал и кольцевой гармонической линзы, м которая при сохранении большого фокусного расстояния имеет продольный размер порядка нескольких миллиметров.

#### Изображающий объектив на двух сторонах подложки

Объектив состоит из отражающей гармонической линзы, двух зеркал, в центре заднего зеркала отверстие для выхода сфокусированного света (рисунок 1).

Такая система за счет большого количества переотражений «сжимает» телеобъектив до размеров подложки толщиной 2–10 мм, при этом можно получать изображающие системы с фокусными расстояниями до нескольких сотен миллиметров.

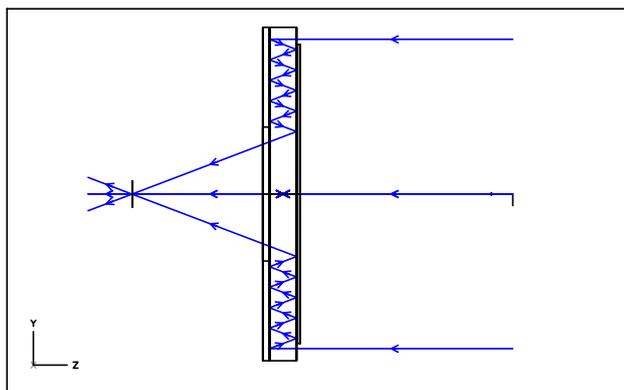


Рис. 1. Планарный кольцевой изображающий объектив

Для такой системы было проведено моделирование в системе Zemax. Основная цель этого моделирования получить функцию рассеяния точки для такой системы.

На рисунке 2 представлен ход лучей в таком объективе. Как видно из рисунка 2 объектив действительно фокусирует попавший в него свет.

Функция рассеяния точки, полученная при моделировании представлена на рисунке 3. Как видно из рисунка 3 функция рассеяния точки хоть и имеет странную форму, но по размерам вполне соответствует функции рассеяния точки рефракционных объективов.

С помощью прямой лазерной записи кольцевая гармоническая линза была изготовлена, затем на две стороны подложки была напылена пленка алюминия (рисунок 4).

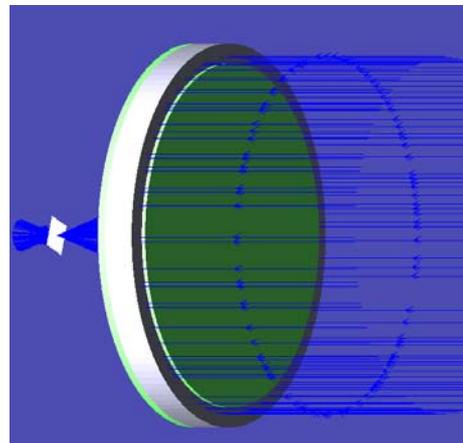


Рис. 2. Ход лучей в планарном кольцевом объективе

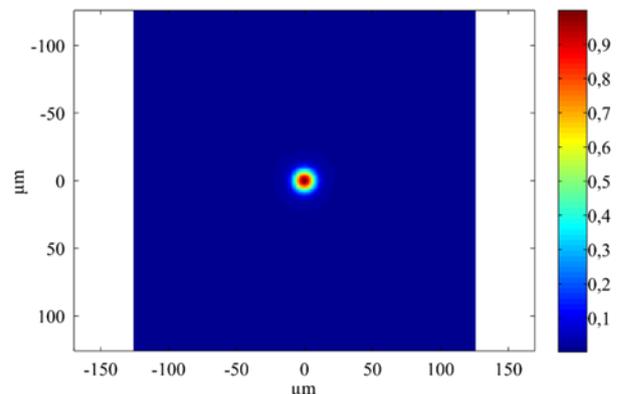


Рис. 3. Функция рассеяния точки кольцевого планарного объектива



Рис. 4 Внешний вид кольцевого планарного объектива

### Заключение

Рассмотрена концепция кольцевого планарного объектива из гармонической линзы и двух зеркал на разных поверхностях подложки. Получена функция рассеяния точки такой системы, параметры которой позволяют говорить о ее практическом использовании.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ в рамках выполнения государственного задания 3.3025.2017/ПЧ, а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 16-29-11744 офи\_м, 16-29-09528 офи\_м).

### Литература

- [1] **Dobson, S. L.** Diffractive lenses for chromatic confocal imaging / S. L. Dobson, P. Sun, Y. Fainman // *Applied Optics*. — 1997. — Vol. 36. — № 20. — P. 4744–4748.
- [2] **Sweeney, D.W.** Harmonic diffractive lenses / D. W. Sweeney, G. E. Sommargren // *Applied Optics*. — 1995. — Vol. 34. — № 14. — P. 2469–2475.
- [3] **Хонина, С.Н.** Сравнительное исследование спектральных свойств асферических линз / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, Р. В. Скиданов, А. А. Морозов // *Компьютерная оптика*. — 2015. — Том 39. — № 3. — С. 363–369.

## An imaging system based on a harmonic of lenses with annular aperture

*R. V. Skidanov<sup>1</sup>, A.A. Morozov<sup>1</sup>, S.V. Ganchevskaya<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences — Branch of the Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

<sup>2</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

Describes the design of a compact imaging lens based on the reflective ring of the harmonic lenses. It is shown that in this case it is possible to create high quality imaging lens.

**Keywords:** Harmonic lens, Imaging system, Lens.

### 1.14. Особенности технологии прямой лазерной записи дифракционных и голограммных структур на пленках a-Si и GeTe

А. А. Кутанов, Н. Сыдык уулу, И. А. Снимщиков, В. П. Макаров, С. С. Великасов  
 Институт физико-технических проблем и материаловедения Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Киргизия

Разработана система интерференционной литографии (СИЛ) с прямой лазерной записью на слое аморфного кремния, предназначенная для формирования дифракционных микроструктур, состоящих из микрорешеток размером 5–10 мкм с заданной ориентацией и периодом, изменяемым в диапазоне 0,4–1,2 мкм, и общем полем записи 300 × 300 мм. Отработана технология магнетронного нанесения однородных пленок a-Si на поверхность стеклянных подложек и получения интерференционных фильтров со слоем аморфного кремния, нанесенного на проводящий слой. Прямая лазерная запись точечных голограмм на пленке аморфного кремния проводилась импульсным УФ лазером с  $\lambda = 355$  нм наносекундными импульсами 5–8 нс. Разработана технология прямой лазерной записи на слое аморфного кремния интерференционного фильтра с контрастным изображением одноименным полупроводниковым лазером с  $\lambda = 405$  нм. Разработанные система и технология прямой записи на a-Si и интерференционных фильтрах с могут быть использованы для записи дифракционных и голограммных структур. Рассмотрены возможности прямой лазерной записи на материале GeTe.

**Ключевые слова:** Оптика, Голограмма, Дифракционные структуры, Аморфный кремний.

#### Введение

В последние годы лазерной интерференционной литографии уделяется большое внимание [1–3]. Это вызвано широкими возможностями метода для записи широкоапертурных дифракционных решеток, периодических структур в оптоэлектронных устройствах. Прямая лазерная запись на слое аморфного кремния является привлекательной для записи дифракционных структур без мокрой химической обработки, и открывает новые возможности изготовления дифракционных структур с использованием лазерного записывающего устройства [2, 3, 5]. Один из простых массовых применений дифракционных структур — это антиотражающие покрытия на основе субволновых решеток [4] с периодом около половины длины волны света. Применение скоростных сканирующих систем интерференционной литографии (СИЛ) [1–3], формирующих дифракционные структуры путем последовательной записи небольших фрагментов или ячеек, позволит решить проблему нанесения дифракционных антиотражающих покрытий на поверхности фотоэлементов солнечных батарей больших размеров. С помощью СИЛ микроструктурирование поверхности осуществляется путем последовательной записи микрорешеток, сформированных интерференцией двух когерентных сфокусированных лазерных пучков и регистрацией в регистрирующем материале. При этом размер решеток лежит, как правило, в диапазоне от единиц до десятков микрометров.

В данной работе представлены особенности технологии прямой лазерной записи дифракционных и голограммных структур на пленках аморфного кремния a-Si и интерференционных фильтров на их основе, и изучены возможности использования соединения GeTe для прямой лазерной записи.

#### Система интерференционной литографии с прямой лазерной записью

В разработанной СИЛ применен известный «параллельно-последовательный» метод записи [2, 3]. В оптической схеме устройства на основе полученного Евразийского патента [5] интерференционная картина формируется в фокальной плоскости микрообъектива в ограниченной области пересечения двух сфокусированных пучков света для записи ячеек дифракционных микроструктур. Каждая ячейка содержит линейную решетку с периодом  $s$  и углом ориентации  $\theta$ , задаваемыми управляющим компьютером. При использовании достаточно мощного импульсного лазера (например, Q-switch) СИЛ позволяет производить прямую запись методом фазового перехода аморфного кремния в кристаллическое состояние. Результаты прямой лазерной записи на слое a-Si с использованием СИЛ представлены на рисунке 1. Отработаны режимы записи точечных голограмм на пленки аморфного кремния с использованием импульсного Q-switch УФ-лазера с  $\lambda = 355$  нм наносекундными импульсами (5–8 нс) и энергией импульса 0,10 мкДж.

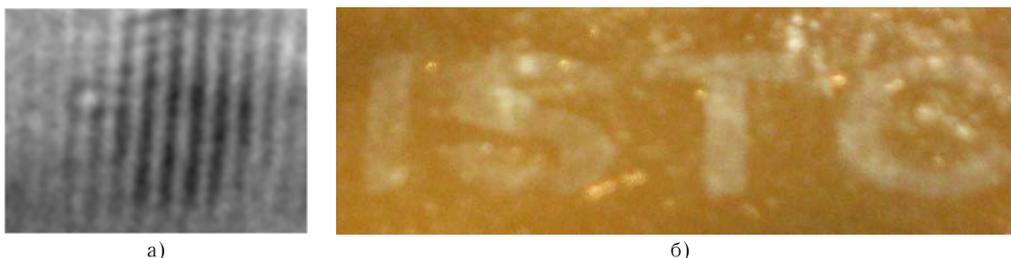


Рис. 1. Фотографии поверхностного рельефа (а) точечной голограммы и запись букв ISTC (б) точечными голограммами, записанных импульсным УФ-лазером ( $\lambda = 355$  нм) на слое аморфного кремния

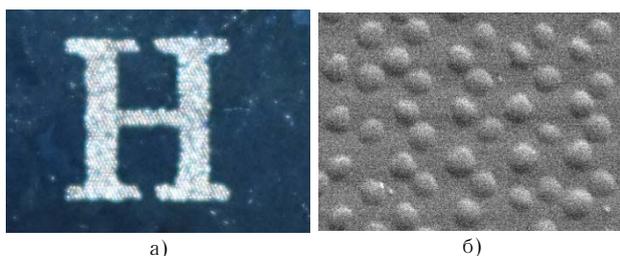


Рис. 3. Фотографии записи сфокусированным лазерным излучением с  $\lambda = 405$  нм буквы Н на слое а-Si интерференционного фильтра (а) и рельефной структуры записи (б) на а-Si, снятой на электронном сканирующем микроскопе

### Интерференционные фильтры со слоем а-Si и прямая запись на них Blu-Ray лазером

Получены интерференционные спектральные фильтры на пленках аморфного кремния, структура которых приведена на рисунке 2. Толщина пленки аморфного кремния  $d$  определяет центральную длину волны полосы пропускания такого фильтра. Интерференционные фильтры на пленках аморфного кремния отражают часть спектра падающего излучения, благодаря явлению многолучевой интерференции в тонких диэлектрических плёнках. Исследована прямая лазерная запись на пленки а-кремния лазерным экспонирующим излучением с длиной волны  $\lambda = 405$  нм (Blu-Ray лазера). Для исследования прямой лазерной записи полупроводниковым Blu-Ray лазером на аморфном кремнии использовался одномодовый Mitsubishi 120 mW лазер. Лазерный луч коллимировался с помощью асферической линзы после лазера, а затем он фокусировался микрообъективом на носитель записи. Длительность лазерных импульсов и их частота контролировалась от компьютера. На рисунке 3а приведена фотография записанной с помощью одномодового Blu-Ray лазера на слое а-Si интерференционного фильтра латинской буквы Н специально для конференции HoloExpo2017. При воздействии сфокусированным лазерным излучением на слой а-Si происходит локальное изменение пропускания и коэффициента преломления среды, формирование рельефа (рисунок 3б). Таким образом, в месте воздействия лазерного излучения на слой а-Si интерференционного фильтра происходит нарушение действия многолучевой интерференции и тем самым появляется возможность записи контрастного изображения на фоне цвета фильтра (рисунок 3а).

Измерение записанного рельефа на рисунке 3б показывает, что при взаимодействии лазерного излучения на пленку аморфного кремния формируется рельеф высотой 30–100 нм. Недостатками использованного для экспериментов полупроводникового лазера являются: зависимость качества лазерного пучка от тока накачки и малая длина когерентности, что затрудняет запись дифракционных микроструктур на слое аморфного кремния.

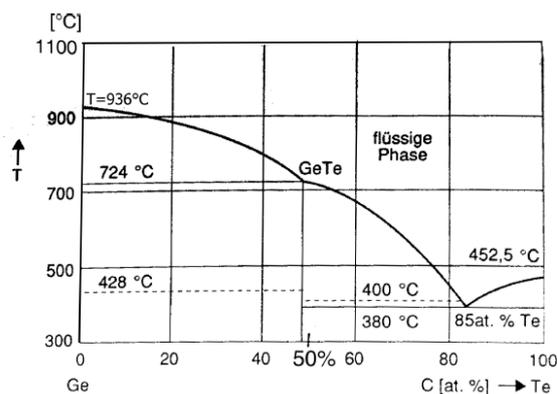


Рис. 4. Диаграмма состояния GeTe в зависимости от процентного содержания Te

Для прямой лазерной записи представляет интерес использование GeTe в качестве регистрирующей среды, так как при повышении концентрации теллура до 85 % в соотношении по атомному весу температура фазового перехода падает до 380 °C (рисунок 4). Для данного материала при локальном воздействии лазерным излучением происходит фазовый переход, приводящий к изменению отражательной способности регистрирующей среды.

### Заключение

Разработана сканирующая система интерференционной литографии (СИЛ), предназначенная для формирования дифракционных микроструктур импульсным лазером, состоящих из микрорешеток размером 5–10 мкм с заданной ориентацией и периодом, изменяемым в диапазоне 0,4–1,2 мкм, и общим полем записи системы 300 × 300 мм. Продемонстрирована запись точечных голограмм на пленки аморфного кремния наносекундными импульсами (5–8 нс) Q-switch УФ-лазера с  $\lambda = 355$  нм. Показано, что при взаимодействии сфокусированного лазерного луча на слой а-Si происходит локальная кристаллизация с изменением показателя преломления среды и формирование рельефа глубиной  $\approx 30$ –100 нм. Это делает привлекательным использование прямой лазерной записи на аморфном кремнии для приложений, обеспечивающих защиту от копирования. Прямая лазерная запись на слое а-Si интерференционного фильтра одномодовым Blu-Ray лазером  $\lambda = 405$  нм позволяет получать запись контрастных изображений. Разработанные СИЛ и технологии прямой записи на пленках аморфного кремния и интерференционных фильтров со слоем а-Si могут быть использованы для записи дифракционных и голограммных структур. Изучены возможности прямой лазерной записи на материале GeTe.

### Благодарности

Авторы выражают признательность Профессору Х. Шаумбургу, Технический университет Гамбург, за обсуждения по вопросу прямой лазерной записи на GeTe.

### Список источников

- [1] **Бредихин, В. И.** Наноразмерная интерференционная литография с импульсным УФ лазером / В. И. Бредихин, В. Н. Буренина, Ю. К. Веревкин, А. В. Кирсанов и др. // ЖТФ. — 2004. — Том 74. — № 9. — С. 86–92.
- [2] **Poleshchuk, A. G.** Microstructuring of Optical Surfaces: Technology and Device for Direct Laser Writing of Diffractive Structures Optoelectronics / A. G. Poleshchuk, A. A. Kutanov, et al. // Instrumentation and Data Processing. — Allerton Press, Inc., 2010. — Vol. 46. — № 2. — P. 171–180.
- [3] **Кутанов, А. А.** Исследование лазерной записи на пленках аморфного кремния для интерференционной литографии / А. А. Кутанов, И. А. Снимщиков, Нурбек Сыдык уулу // Журнал Доклады НАН КР. — 2015. — № 2. — С. 19–26.
- [4] **Schopf, R. E.** Antireflective Submicrometer Surface-Relief Gratings for Solar Applications / R. E. Schopf, T. Hultsch, J. Lotz, et al. // Solar Energ. Mater. Solar Cells. — 1998. — Vol. 54. — № 1. — P. 333–342.
- [5] **Kutanov, A.** Direct laser recording on amorphous silicon film / A. Kutanov, I. Snimshikov, Nurbek Sydyk uulu // Physics Procedia. — 2015. — Vol. 73. — P. 82–86.
- [6] **Патент № 007 874 Евраз.** Устройство для записи дифракционных элементов / А. Г. Полещук, А. А. Кутанов, В. П. Бесмельцев, И. А. Снимщиков. — Оpubл. 2007, Бюл. № 1.

## Features of the technology of direct laser recording of diffraction and hologram structures on a-Si and GeTe films

*A. A. Kutanov, I. A. Snimshikov, N. Sydyk uulu, V. P. Makarov, S. S. Velikasov*

Institute of Physical and Technical Problems and Material Science, National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz Republic

Developed scanning system for interference lithography designed to form the diffraction microstructures consisting of microgratings of 5–10  $\mu\text{m}$  with a given orientation and period varies in the range of 0.4–1.2  $\mu\text{m}$ , and the total field recording system. The system was used to research direct laser recording of microgratings on amorphous silicon films deposited by magnetron sputtering on the surface of the glass substrates. We have demonstrated direct laser recording of dot holograms on amorphous silicon film by nano-second pulse UV laser with  $\lambda = 355 \text{ nm}$ . Technology for fabrication of interference filters with uniform a-Si film is developed. The results of research on the direct laser recording on amorphous silicon layer of interference filter using semiconductor single-mode Blu-Ray laser with  $\lambda = 405 \text{ nm}$  with contrast image are presented. Designed system for interference lithography and technology for direct recording on a-Si films and based on it interference filters could be used to record diffraction and hologram structures, as well as for the surface micro structuring by laser recording. The possibility use of GeTe compound for direct laser recording with phase change of material is investigated.

**Keywords:** Optics, Hologram, Diffraction structures, Amorphous silicon.



## 2. Технологии защитных голограмм



## 2.1. Применение цифровых технологий при формировании первичного фазового рельефа в двухэтапной оптической записи защитных голограмм

*Ч. Б. Кайтуков, В. А. Киселев, А. В. Яновский*  
ФГУП «НТЦ «Атлас», Москва, Россия

Представлен подход к созданию защитных голограмм на основе комбинированной голограммы, совмещающей в себе цифровой и аналоговый этапы записи. Рассматриваются технические, технологические и математические задачи, подлежащие решению при создании подобных комбинированных голограмм. Анализируются преимущества и недостатки присущие данному подходу.

**Ключевые слова:** Двухэтапная оптическая запись голограммы, Цифровая голограмма, Комбинированная голограмма.

На общем фоне разнообразных защитных средств и способов, призванных пресечь распространение контрафактных изделий, выделяется защитная голография, которая, благодаря высокому защитному потенциалу, является надёжным способом в борьбе с поддельной продукцией и документацией. Наличие защитной голограммы, на документах и товарной упаковке, стало символом их подлинности. Метод защитной голографии состоит в выпуске и последующем неотделимом нанесении оригинальных голографических защитных голограмм (ЗГ) на сопровождаемое изделие или документ.

В качестве указанных голографических этикеток изначально применялись радужные голограммы (РГ), записанные на оптическом столе в двухэтапной схеме. Главными отличительными особенностями указанных голограмм, предопределившими их широкое применение, является:

- возможность наблюдать (восстанавливать) яркое, полноценное голографическое изображение в реальных или искусственных цветах при освещении некогерентным, немонахроматическим источником света (солнечный свет, лампа накаливания);
- возможность получать крупноформатные (до 150 мм) 2D, 2D/3D, 3D цветные изображения;
- широкий угол обзора (вплоть до кругового) и значительная глубина сцены при необходимости разделенная на промежуточные плоские планы;
- технологическая возможность массового тиражирования.

Развитие цифровых технологий привело к появлению так называемых цифровых голограмм, изготавливаемых по технологии электронно-лучевой литографии (E-beam lithography) а также дот матрикс или имидж матрикс (DotMatrix, ImageMatrix) и дало возможность перейти к созданию ЗГ более высокого уровня защиты благодаря возможности внесения микротекстов, микроизображений, микрооптических элементов, кинематических эффектов и других скрытых и визуальных признаков.

Однако, аналоговые радужные голограммы, несмотря на все сложности их изготовления, ввиду целого ряда своих уникальных свойств, как изображительных, так и защитных, не исчезают из употребления и присутствуют на рынке голографической продукции в качестве ЗГ.

Достижение высоких изобразительных и защитных свойств РГ является результатом сравнительно длительного технологического процесса по её изготовлению. Этот процесс можно условно разделить на следующие основные этапы:

- компьютерная проработка дизайна будущей РГ — размеры и форма, прорисовка всех элементов композиции и их цветовой палитры, расчет условий для динамических и цветовых эффектов;
- расчёт геометрических параметров оптической схемы записи РГ поэтапно;
- компьютерное разбиение многоплановой композиции общей сцены по глубинам и ракурсным углам на отдельные планы и цветовые зоны с изготовлением теневых масок;
- запись на светочувствительный носитель первичной голограммы (Н1) с использованием полученных теневых масок;
- запись на светочувствительный носитель вторичной голограммы (Н2);
- трансляция полученного рельефа Н1 на никелевую мастер-матрицу;
- тиражирование РГ.

Каждый из приведённых этапов по-своему важен и малейший просчёт или небрежность отрицательно сказывается на итоговом качестве РГ, на её изобразительных и/или защитных свойствах. Но особенно трудоёмким и критичным для качества, традиционно считается этап записи первичной голограммы Н1. Первичная голограмма представляет собой совокупность безлинзовых голограмм Френеля, каждая из которых несёт информацию об отдельных участках будущей голограммы в определенной спектральной (цветовой) зоне. Исходя из оптической схемы записи радужной голограммы, все Н1 имеют щелевидную форму и находятся на едином плоском носителе, обычно, это рельеф в фоторезистивном слое, нанесенном на стеклянную пластину.

На этапе записи Н1 сложность заключается в достижении баланса между двух взаимоисключающих свойств — максимально возможной дифракционной эффективности (ДЭ) и минимального уровня шумов. Достигается это правильным подбором таких параметров как: соотношение сигнал/опора для каждого цвета, плана и ракурса; значение экспозиции. Не-

смотря на возможность проведения точных фотометрических измерений, подбор этих параметров в большинстве случаев осуществляется путём эмпирического варьирования. Вся сложность процесса заключается в неравнозначности указанных параметров для разных щелевых голограмм в зависимости от положения на общей первичной голограмме. В некоторых случаях они варьируются также и для разных участков одной и той же щелевой голограммы — в зависимости от позиций кадров с меняющимися угловыми ракурсами. Разница в размерах изображений на теневой маске по отношению к размеру маски (скважность изображения) так же вносит сложности в поиск и достижение баланса. Конечной целью при изготовлении Н1 является получение в плоскости анализа, то есть плоскости формирования Н2, совокупности равно энергетических зон, образующих единое поле голограммы. Нарушение указанного требования приводит к возникновению трудно устранимых сложностей на стадии записи Н2.

Для упрощения и усовершенствования процесса записи Н1 предлагается воспользоваться цифровой технологией записи. Принимая во внимание, что запись Н1 — это результат преобразования Френеля в ближней зоне, мы получаем возможность рассчитывать структуру рельефа в математической среде, а затем изготовить её, не прибегая к записи на оптическом столе в интерферирующих пучках, а воспользоваться установкой имидж матрикс.

При создании голографического рельефа по технологии ImageMatrix, на жидкокристаллический дисплей выводится полутоновое изображение, рассчитанное для небольшого участка одной из щелевых голограмм Н1. В изображении требуемой глубине рельефа голограммы соответствует определенная яркость пикселя дисплея. Затем дисплей освещается и изображение с большим (до 120<sup>×</sup>) уменьшением проецируется на фоторезистивный слой. Далее, пластина Н1 сдвигается, и процедура повторяется. После проявления получа-

ется рельеф Н1 с заданными характеристиками, полностью готовый к экспонированию в схеме получения Н2 на оптическом столе.

Использование такой технологии на первой стадии записи радужной голограммы исключает необходимость изготовления большого количества масок для оптической записи, а также исключает многоступенчатый процесс записи разных по глубине планов и угловых ракурсов голограммы. Дополнительным преимуществом так же является отсутствие необходимости подбора баланса интенсивностей в опорном и объектном лучах и экспонируемой дозы.

Основная нагрузка при записи такой комбинированной голограммы ложится на расчетную часть. Трудности на этом этапе вызывает большое количество вычислений, так как разрешение Н1 составляет 5000 точек на миллиметр, а размер при минимальном угле обзора голограммы и наборе цветов составляет 200 × 10 мм, в результате необходимо обработать 10<sup>7</sup> отсчетов и в каждом учесть влияние всех точек (участков) будущей голограммы.

Для расчета рельефа Н1 использовались метод Герцберга — Сэкстона и вычисление интеграла Френеля. Уже на стадии численного моделирования был сделан выбор в пользу метода Герцберга — Сэкстона, по параметрам быстродействия и отношения сигнал/шум.

Ограниченность линейных размеров и углов обзора, так же присутствие шума на тестовых голограммах не позволяет в настоящее время в полном объеме составить заключение о визуальной привлекательности и уровне защитных свойств комбинированных голограмм. Проведенные эксперименты показали в целом применимость метода для двухэтапной записи радужных голограмм. Использование адаптированных под данную задачу программных и аппаратных средств позволит ускорить процесс расчета и довести предложенную технологию до внедрения в производственную цепочку изготовления защитных голограмм.

#### Список источников

- [1] Яновский, А. В. Комбинированная защитная голограмма на основе планарной цифровой и объемной аналоговой записи изображений / А. В. Яновский // Одиннадцатая Международная конференция «ГолоЭкспо-2014». Сборник научных трудов. — Голография. Наука и практика. Сочи. 2014.
- [2] Патент № 2 113 357 РФ. Способ создания рельефно-фазовой голографической защитной метки / А. Н. Ячиков, С. В. Куракин — Оpubл. 1998.
- [3] Сороко, Л. М. Голография и интерференционная обработка информации / Л. М. Сороко // Успехи физических наук. — 1966. — Том 90. — № 1.
- [4] Кольер, Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. — М.: Мир, 1973.
- [5] Колфилд, Г. М. Оптическая голография. — Мир, 1982.
- [6] Рожкова, Г. И. Бинокулярное зрение. В книге Руководство по физиологии. Физиология зрения. — М.: Наука, 1992.
- [7] Валюс, Н. А. Стереоскопия: фотография, кино, телевидение. — М.: Искусство, 1986.
- [8] Рожков, С. Н. Стереоскопия в кино-, фото-, видеотехнике: Терминологический словарь / С. Н. Рожков, Н. А. Овсянникова. — М.: Парадиз, 2003.

## **Application of digital technologies in the formation of the primary phase relief in a two-stage optical recording of protective holograms**

*C. B. Kaitukov, V. A. Kiselev, A. V. Yanovsky*  
FSUE "NTC "Atlas", Moscow, Russia

An approach to the creation of protective holograms based on a combined hologram combining the digital and analog stages of recording is presented. Technical, technological and mathematical problems to be solved when creating such combined holograms are considered. The advantages and disadvantages of this approach are analyzed.

**Keywords:** Two-stage optical hologram recording, Digital hologram, Combined hologram.

## 2.2. Устройство контроля качества голограмм, основанное на методе сравнительного анализа оптических характеристик с использованием машинного зрения

*А. М. Сергиенко<sup>1</sup>, Д. А. Кожевников<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> АО «НПО «Криптен», Дубна, Россия

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Данная работа посвящена разработке устройства контроля качества (УКК) голограмм. УКК позволяет производить сравнение голограмм между собой, анализируя параметры яркости и контрастности отдельных, заданных, областей голографического изображения. УКК может применяться для контроля матриц, на которых критична повторяемость качества голографических изображений.

**Ключевые слова:** Оптика, Голография, Контроль качества, Измерения.

Необходимость разработки УКК продиктована производственной необходимостью поэлементного контроля качества матриц, состоящих из повторяющихся голографических изображений. Поэлементный контроль изображений, на основании заданного допустимого разброса значений параметров контроля, позволяет оценить пригодность матрицы в целом для дальнейшего тиражирования продукции.

УКК состоит из трех основных компонент:

- программное обеспечение;
- линейные перемещатели по двум координатам;
- сенсор машинного зрения.

Программное обеспечение отвечает за перемещение сенсора машинного зрения над областью матрицы; получение и обработку данных от сенсора машинного зрения и формирование отчета о произведенных измерениях.

Линейные перемещатели обеспечивают передвижение сенсора машинного зрения в продольном и поперечном направлениях относительно матрицы, с точностью до десятых долей миллиметра.

Сенсор машинного зрения, используя собственное ПО, позволяет измерять контролируемые параметры голограмм, такие как яркость и контрастность, а также сохранять изображение inspected элемента.

УКК производит поэлементный контроль голографических изображений матрицы, измеряя яркость и контрастность отдельных, заранее заданных пользователем, областей изображения. Результатом контроля являются значения параметров яркости и контраста, в относительных единицах, для набора областей изображения. Имея заданный порог допустимых отклонений значений контролируемых параметров, программное обеспечение УКК производит общую оценку качества матрицы с указанием количества элементов, не прошедших контроль.

## The device for quality control of holograms, based on a method comparative analysis of optical characteristics using machine vision

*A. M. Sergienko<sup>1</sup>, D. A. Kozhevnikov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Research and Production Center “Krypten”, Dubna, Russia

<sup>2</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

The current work is devoted to the development of a quality control device for holograms. The device allows to compare holograms among themselves, analyzing the brightness and contrast parameters of individual, specified, regions of a holographic image. The device can be used to control matrixes, for which the repeatability of the quality of holographic images is critical.

**Keywords:** Optics, Holography, Quality control, Measurements.

### 2.3. Экспериментальные исследования по контролю качества защитных голограмм на основе метода косвенных измерений периода и глубины поверхностного микрорельефа

В. В. Колочкин<sup>1</sup>, И. К. Цыганов<sup>1</sup>, С. Б. Одионов<sup>1</sup>, Н. В. Пирутин<sup>1</sup>, В. Е. Талалаев<sup>1</sup>, Е. Ю. Злоказов<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований по оценке периода и глубины поверхностного микрорельефа защитных голограмм. Исследования проведены на разработанном макете оптико-электронного прибора для оперативного измерения данных параметров. Представлены функциональная схема оптико-электронного прибора и численные экспериментальные данные.

**Ключевые слова:** Защитная голограмма, Контроль качества, Дифракционная решётка, Микрорельеф.

#### Введение

На отечественных предприятиях по изготовлению защитных голограмм контроль качества защитных голограмм (ЗГ) осуществляется на основе экспертных оценок. Результаты такого контроля являются субъективными и не могут считаться достоверными. В настоящее время не определены критерии, позволяющие оценить качество изготавливаемых ЗГ. Предлагается критерий принятия решения о качестве ЗГ на основе сравнения значений параметров микрорельефа дифракционных решёток (ДР) контролируемого и эталонного образцов защитных голограмм.

Известные методы контроля ЗГ на основе прямых измерений геометрических параметров профиля ДР с помощью атомно-силовых микроскопов являются трудоёмкими, что недопустимо в технологическом процессе производства голограмм. Поэтому существует потребность в специализированной аппаратуре для осуществления оперативного контроля качества защитных голограмм.

#### 1. Описание принципа действия макета оптико-электронного прибора

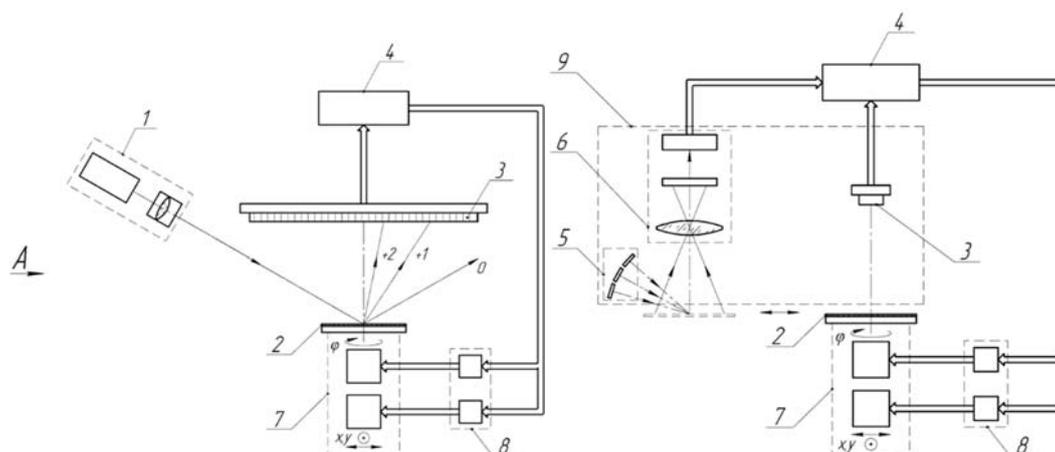
В публикациях [1–3] авторами данной работы приводится теоретическое описание метода косвенного

измерения параметров поверхностного микрорельефа дифракционных решёток по зарегистрированным значениям интенсивности главных максимумов дифракционной картины при подсветке области защитной голограммы когерентным монохроматическим излучением.

Однако стоит заметить, что необходимо также использовать методы прямых измерений для получения исходной информации о микрорельефе защитных голограмм, которые назначаются экспертной комиссией в качестве эталонных образцов.

На рисунке 1 представлена функциональная схема разработанного авторами макета оптико-электронного прибора (ОЭП) для оперативного определения параметров микрорельефа защитных голограмм. Принцип действия прибора основан на подсветке когерентным излучением области контролируемой ЗГ и последующей регистрации главных максимумов дифракционной картины фотоприёмным устройством.

Конструктивно линейка ПЗС и ТВ-камера с блоком светодиодов канала наведения объединены в единый узел 9 — оптическую головку, имеющую возможность плоскопараллельного перемещения в плоскости чертежа (рисунок 1). Блок лазерных диодов с системой



1 — блок лазерных диодов с системой формирования пучков излучения; 2 — контролируемый образец ЗГ; 3 — линейка ПЗС; 4 — компьютер; 5 — блок светодиодов канала наведения; 6 — ТВ-камера канала наведения; 7 — приводы моторизованной системы линейных и угловых перемещений контролируемого образца ЗГ; 8 — контроллеры моторизованной системы линейных и угловых перемещений; 9 — оптическая головка

Рис. 1. Функциональная схема оптико-электронного прибора



Рис. 2. Внешний вид макета ОЭП для контроля качества защитных голограмм

формирования пучков излучения и линейка ПЗС образуют канал контроля параметров элементарных ДР защитных голограмм.

Первая операция при выполнении контроля заключается в наведении оптической головки 9 на область контроля. При выполнении этой операции визирная ось ТВ-камеры совмещается с центром контролируемой зоны. С помощью приводов 7 линейных и угловых перемещений осуществляется перемещение контролируемого образца ЗГ для наведения на конкретную область с набором одинаково ориентированных элементарных ДР, в которой требуется осуществить измерение параметров. При наведении на контролируемую зону подсветка поверхности ЗГ осуществляется излучением от блока 5 светодиодов канала наведения. После выполнения этой операции производится перемещение головки таким образом, чтобы плоскость, образованная осью блока лазерных диодов и осью линейки ПЗС, проходила через центр контролируемой области ЗГ. На рисунке 2 приведена фотография макета прибора.

Таблица 1. Результаты измерений пространственного периода микрорельефа

Номер образца ДР	Значение пространственного периода, мкм			
	Измерения на АСМ		Измерения на разработанном макете ОЭП	
	По зонам ДР	Среднее	По зонам ДР	Среднее
1	1,200	1,2017	1,202	1,2043
	1,203		1,205	
	1,202		1,206	
2	1,298	1,2987	1,297	1,3010
	1,300		1,302	
	1,297		1,304	
3	0,647	0,6487	0,649	0,6517
	0,650		0,650	
	0,649		0,656	
4	0,998	1,0020	1,002	1,0050
	1,005		1,008	
	1,003		1,005	
5	1,550	1,5527	1,549	1,5540
	1,555		1,556	
	1,553		1,557	

При выполнении измерений регистрируются координаты главных максимумов дифракционной картины, в том числе  $m = 1, 2, 3, \dots$ , а также значения интенсивностей в этих максимумах. По измеренным значениям координат и интенсивностей в компьютере вычисляются пространственный период и высота профиля. Глубина профиля микрорельефа вычисляется по расчётным теоретическим калибровочным зависимостям [3] распределения интенсивности в дифракционных максимумах от параметров микрорельефа. Пространственный период микрорельефа определяется по формуле

$$T_0 = \frac{\lambda}{|\sin\beta_1 - \sin\beta_2|},$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — угловое положение первого и второго главных максимумов.

Макет оптико-электронного прибора предназначен для контроля качества ЗГ с диапазоном пространственных периодов элементарных дифракционных решёток от 0,55 до 1,5 мкм. В канале контроля в качестве основного источника подсветки используется лазерный диод, излучающий на длине волны 0,405 мкм.

## 2. Результаты экспериментальных исследований

Макет ОЭП был использован для проведения экспериментальных исследований по определению пространственного периода и глубины рельефа. Экспериментальные исследования проводились с использованием серийно выпускаемых образцов защитных голограмм. Погрешность измерений макета прибора оценивалась путём сравнения полученных на нём значений параметров микрорельефа со значениями, измеренными на зондовом сканирующем атомно-силовом микроскопе (АСМ). На основе проведённых исследований по оценке износа микрорельефа рабочих матриц в процессе тиражирования защитных голограмм методом прямых измерений было установлено, что откло-

Таблица 2. Результаты измерений глубины микрорельефа

Номер образца ДР	Значение глубины рельефа, мкм			
	Измерения на АСМ		Измерения на разработанном макете ОЭП	
	По зонам ДР	Среднее	По зонам ДР	Среднее
1	0,151	0,1537	0,153	0,1557
	0,156		0,155	
	0,154		0,159	
2	0,185	0,1903	0,187	0,1913
	0,194		0,192	
	0,192		0,195	
3	0,231	0,2363	0,219	0,2307
	0,240		0,238	
	0,238		0,235	
4	0,279	0,2837	0,279	0,2813
	0,287		0,284	
	0,285		0,281	
5	0,321	0,3243	0,320	0,3207
	0,325		0,324	
	0,327		0,318	

нения от среднего значения пространственного периода при изготовлении ЗГ даже в одинаковых условиях технологического процесса достигают 4 %, а глубины рельефа — 20 %. Были назначены допустимые погрешности ОЭП при измерениях пространственного периода и глубины рельефа из расчёта, что данные величины должны быть, по крайней мере, в 4–5 раз меньше значений установленных отклонений. Было установлено, что допустимой погрешности измерения пространственного периода не должна превышать 10 нм, а допустимая погрешность измерения глубины микрорельефа не должна превышать 6 нм. Результаты измерений пространственного периода и глубины микрорельефа дифракционных решёток, полученных с помощью атомно-силового микроскопа и разработанного макета оптико-электронного прибора приведены в таблице 1 и таблице 2 соответственно.

Из таблицы 1 следует, что отличие средних значений пространственного периода, измеренных на атомно-силовом микроскопе и на разработанном макете ОЭП, не превышает 3 нм, что укладывается в допуск по погрешности измерения пространственного

периода. Максимальное отличие средних значений глубины рельефа в таблице 2 составляет 5,6 нм, что не превышает значение допустимой погрешности измерения глубины микрорельефа.

### Заключение

В ходе экспериментальных исследований установлено, что разработанный макетный образец оптико-электронного прибора удовлетворяет по точности измерений. Результаты экспериментальных исследований подтверждают работоспособность метода косвенных измерений параметров поверхностного микрорельефа защитных голограмм по зарегистрированным значениям интенсивности дифракционных максимумов.

### Благодарности

Работа проведена в МГТУ им. Н. Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по соглашению № 14.577.21.0223 (ID PRFMEFI57716X0223).

### Список источников

- [1] **Kolyuchkin, V. V.** The quality inspection method for master-matrices of security holograms / V. V. Kolyuchkin, S. B. Odinokov, I. K. Tsyganov // *Physics Procedia*. — 2015. — Vol. 73. — P. 313–319.
- [2] **Колочкин, В. В.** Метод когерентного контроля глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов / В. В. Колочкин, Е. Ю. Злоказов, С. Б. Одинок, В. Е. Талалаев, И. К. Цыганов // *Компьютерная оптика*. — 2015. — Том 39. — № 4. — С. 515–520.
- [3] **Kolyuchkin, V. V.** The influence of diffraction gratings relief noise on the intensity distribution in diffraction orders / V. V. Kolyuchkin, S. B. Odinokov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — Vol. 737. — № 1. — P. 012070. — 5 p.

## Experimental research of security hologram quality inspection based on indirect measurements of microrelief period and depth

*V. V. Kolyuchkin<sup>1</sup>, I. K. Tsyganov<sup>1</sup>, S. B. Odinokov<sup>1</sup>, N. V. Piryutin<sup>1</sup>, V. E. Talalaev<sup>1</sup>, E. Yu. Zloказov<sup>1,2</sup>*

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

<sup>2</sup> National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

Results of experimental research aimed at indirect measuring microrelief period and depth in security holograms are represented in this paper. Research were carried out using model of developed optoelectronic device for operational measurements of microrelief parameters. A functional scheme of an optoelectronic device and numerical experimental data are presented.

**Keywords:** Optics, Holography, Diffraction optical elements Security hologram, Quality inspection, Diffraction grating, Microrelief.

## 2.4. Особенности формирования асимметричных рельефов при записи голограмм нулевого порядка

А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин  
ООО «Дотрикс», Москва, Россия

Задача формирования асимметричных рельефов в защитных и изобразительных рельефно-фазовых голограммах актуальна для решения многих задач. Среди них:

- повышение дифракционной эффективности голограмм, и, соответственно, яркости восстановленных изображений;
- создание защитных признаков для неосведомленной идентификации в защитных голограммах;
- создание новых визуальных эффектов для изобразительных голограмм.

Дифракционная эффективность рельефных голограмм с симметричным профилем ограничена величиной 33–40 % [1] в зависимости от формы профиля. Асимметричный профиль, например, эшелетт, дает в теории возможность увеличить яркость в полезном дифракционном порядке до 80 % [2]. Формирование тороидального профиля позволяет записывать так называемые трекограммы. А более или менее точное выдерживание профиля трехмерного объекта создает впечатление большого объема при малой реальной глубине рельефа. При этом яркость кажущегося трехмерного объекта существенно выше, чем у дифракционного его изображения.

Вместе с тем адекватное выдерживание формы профиля дифракционных полос или других элементов рельефа подвержено воздействию значительного количества факторов. К ним относятся, например:

- нелинейность пространственных модуляторов света,
- нелинейность отклика регистрирующей среды,
- сильная зависимость характеристической кривой среды от условий проявления,

– технологические факторы, искажающие рельеф на всех этапах формирования профиля в серийном продукте (гальваническое копирование, прокатка, нанесение клеевого слоя, усадки, и т. д.)

И если первые два фактора еще можно учесть и скорректировать, воздействие двух последних групп, особенно технологических факторов с трудом поддаются контролю в серийном производстве.

На рисунке 1 представлены кривые зависимости мощности на выходе LCoS от сигнала градаций серого, подаваемых на вход. Видно, что до программной коррекции линейности существовали области значительной нелинейности, что приводило бы к значительному искажению формы рельефа и даже к обращению рельефа в области высоких значений серого. После коррекции линейность характеристики укладывается в 6 % во всем диапазоне входного сигнала.

На рисунке 2 представлена контрастная кривая типичного для голографии фоторезиста Shipley S1800. Из графика кривой видно, что линейный участок отклика среды соответствует изменению экспозиции всего, примерно, в 2,4 раза. И, к тому же, сам угол наклона сильно зависит от условий проявки.

Проблема частично решается тщательным соблюдением температуры и состава проявляющего раствора. Тем не менее, разброс свойств резиста по партиям и старение материала оказывают негативное воздействие на соблюдение профиля.

Анализ технологических факторов в массовом производстве позволил определить, что наиболее разрушительное воздействие на профиль оказывает прокатка пленки на эмбоссере, особенно в схеме «сталь-сталь». Использование УФ-прокаточных машин во многом решает проблему.

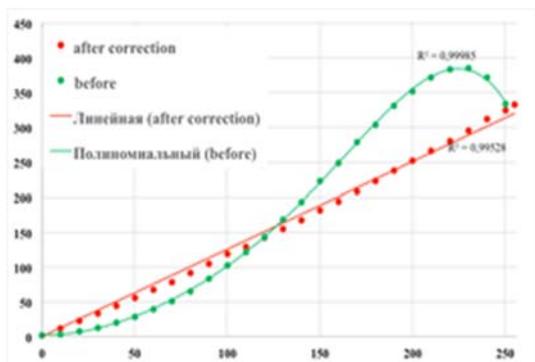


Рис. 1. Распределение мощности на выходе пространственного модулятора LCoS до и после программной коррекции

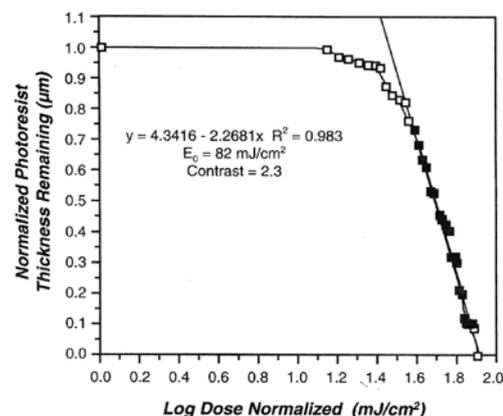


Рис. 2. Гамма-кривая фоторезиста Shipley S1800

### Список литературы

- [1] **Кольер, Р.** Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. — М.: Мир, 1973.  
[2] **Пейсахсон, И. В.** Оптика спектральных приборов. — Л., 1975.

## Some aspects of asymmetrical relief profile recording for “zero order holograms”

*A. F. Smyk, A. V. Shurygin*  
Dotrix, Moscow, Russia

Holographic fringes or reflective elements shaping technique is of great importance for security and display holography. It allows some advantages: higher efficiency and image brightness, new security elements for uninformed authentication, new and attractive visual effects for display holography. Efficiency of a thin phase hologram is limited by 33–40 % depending on the holographic fringe profile [1]. An asymmetrical profile, like echelette for example, gives around 80 % [2] in the main diffraction order. Toroidal profile forms so called “trekograms” with high depth and high brightness images. The exact shaping of a reflective elements gives an impression of a volume object while real profile thickness is low. The subjective brightness of such images is much higher than holographic ones. Many factors limit the exact shaping of profiles. Among them: non-linearity of SLM, non-linearity of recording medium, strong dependence of relief height on the developing conditions, mass production technological factors, like electroforming, embossing, shrinkage, etc. Technology factors study showed the embossing distorts the shape most of all. UV embossing helps a lot. The results are illustrated by images and data.

## 2.5. New diffractive effects for security holograms produced with Geolas Originators

S. Zacharovas<sup>1</sup>, R. Bakanas<sup>1,2</sup>, A. Bulanovs<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Geola Digital UAB, Vilnius, Lithuania

<sup>2</sup> Department of Materials Engineering, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania

<sup>3</sup> Innovative Microscopy Center, Daugavpils University, Daugavpils, Latvia

New embossed hologram originating technique, producing effects which are not possible to reproduce with commonly used image matrix Kinemax type equipment was developed. Thus, Geola Digital Ltd. is launching a series of unique equipment devoted to embossed holograms originating. Equipment allows one to produce master-holograms containing simultaneously achromatic and true colour deep 3D images. Such images are perfectly viewable while illuminated with light sources situated in front of the hologram or at its back. The Originators also can produce with higher precision all effects achievable with commonly used image-matrix originators.

**Keywords:** Hologram, Security, Pulsed RGB laser, Photoresist, Master-original, Origination, Embossed hologram, Deep 3D hologram, Optical recombination, Achromatic animated hologram.

### 1. Introduction

Embossed holograms are nowadays widely used for security applications. However in the banknotes protection market other diffractive elements are starting to play main role, we believe that holograms containing unique visual appearance combined with deep 3D images and conventional security elements produced employing conventional image-matrix technique still can play an important role in document protection. We believe that such holograms could be successfully used in banknotes protection as well.

Modern embossed hologram used for security applications are mostly originated employing the following direct master-original writing techniques: E-beam, Dot-matrix, Image-matrix. Those techniques allow one to obtain quite sophisticated microscopic images containing various complex optical security features, usually identified with optical aids. Some companies employ digital H1 master recording and analogue H1–H2 transfer of said H1 master (DI-HO). This technique allows integrating some optical security features identified with optical aids. Few companies still employ pure analogue H1 master recording and analogue H1–H2 transfer, which, however could supply three-dimensional image on hologram, usually is providing only differently positioned images of 2D transparencies.

As per our knowledge — no originating technique can easily and so quickly produce achromatic deep 3D images combined with true colour images. Also, we do not know other techniques producing holograms which distinctive features are equally well viewable from their back and from their front.

So we have designed and have manufactured pilot Originators enabling one to produce master-original holograms containing achromatic and true colour deep 3D images viewable while illuminated with light sources situated in front of the hologram or at its back. The Originators also can produce with higher precision all effects achievable with commonly used image-matrix originators.

### 2. Geola's embossed holograms originators

Direct hologram writing with pulsed lasers technique was developed by Geola in 1999. The technique was then perfected for poster-sized hologram manufacturing and from 2007 is started to be developed towards embossed holograms originating. As a result Geola's experts have created a technique to originate full colour, achromatic, or full colour with achromatic elements transmission holograms containing deep 3D images with animation. Said images are easily recognized by general public and are distinctively different from 3D images generated by other embossed holograms originating techniques.

That was the basis for the developing of the series unique Originators combining the most advanced image-matrix features with direct-write holographic image imprinting onto positive photoresist with preferably pulsed lasers, especially designed by Geola for this purpose.

Standard origination area for holograms is  $150 \times 150$  mm ( $6 \times 6$ ) and can be enlarged on demand. The usage of even the slowest pulsed laser flashing at 30 Hz allows exposing whole  $150 \times 150$  mm with  $100 \times 100$   $\mu$ m holopixels just in 25 hours. Originators accept positive photoresist plates in size  $200 \times 250$  mm or  $200 \times 300$  mm, which means that one can use optical recombination instead of mechanical.

Our Blue Phoenix Originator Series currently consists of three machines types:

– IMP-6 — Image-Matrix Printer — the working principle of this Originator is similar to Kinemax or Firefly, but the machine itself is easier to operate, is cost-effective and (we are sure) produces better holograms. This originator employs either a CW or a pulsed laser. The pulsed laser option allows the printing of large format master-originals much quicker than with any other originator.

– DIWO-6 — Direct Write Originator — the working principle is similar to that of our printers for poster-sized holograms. This originator uses a pulsed laser to rapidly record deep holographic 3D images, with an image depth of up to 75 % of the hologram width, onto a photoresist plate.

– IMP-6-DW — this machine combines IMP and DIWO writing heads allowing the origination of master-

Table 1. Effects producible with Geola's Blue Phoenix IMP-6 Originator

Graphical and security effects	Holographic Diffractive elements	Embossed type holograms containing	Lithographic Diffractive elements
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lithographic effects</li> <li>- Diffractive microtext up to 20microns</li> <li>- Nanotext down to 5microns</li> <li>- Microimages</li> <li>- Nanoimages</li> <li>- Pearl effect</li> <li>- Letter lens</li> <li>- Lenses</li> <li>- Hidden images (CLR) static and animated</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Color motion and kinetic motion</li> <li>- True color 2D, True colour 2D/3D</li> <li>- True color stereograms with 2–49 parallax views</li> <li>- Multi-channel color holograms with 2–49 channels</li> <li>- Multilayer 2D/3D with unlimited number of layers and depth modulation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custom nanostructures — up to 10 in one elementary hologram (diffuse white area, 2D grating, axicon, Fresnel micro lenses and etc.).</li> <li>- Images composed of common diffraction gratings (700–1400 l/mm, orientation 0–180°; color, angle, brightness and emboss modulation).</li> <li>- Images composed of 2D diffraction gratings (700–1400 l/mm, orientation 0–90°; color, angle and brightness modulation).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fresnel lens effect of any shape and image. Additional angle and frequency modulation features are available. Round and elliptical lens generation of various sizes and types.</li> <li>- Images composed of Blazed grating (with asymmetric saw tooth grating profile). Gratings frequency range 1–500 l/mm, orientation 0–360°, angle and frequency modulation.</li> <li>- Images composed of symmetric grating. Gratings frequency range 1–500 line/mm, orientation 0–180°, angle and frequency modulation.</li> <li>- Images composed of 2D grating. Gratings frequency range 1–500 l/mm, orientation 0–90°, angle and frequency modulation</li> </ul>

holograms containing deep 3D holographic images and all modern optical security features.

### 2.2. Blue Phoenix IMP-6 — Originator

Since in this Originator are implemented well known Image-matrix hologram originating principles, we will mention here only such its characteristics that distinguish it from other Image-matrix printers — Kinemax, Firefly, and alike.

The Blue Phoenix IMP-6 Originator allows the origination of all commonly used types of security holograms and diffractive optical elements. The equipment has three operating modes — holographic, lithographic and combined mode with fully programmable switching between these modes *during* hologram origination.

Unique features of this Originator include:

- Direct image projection on photoresist with resolution of up to 26,000 dpi.
- Use of custom bitmap images (up to 10 per hologram) for filling a holographic micro-frame. This option allows the realization of direct image projection at a resolution of 210,000 dpi and allows the recording of various custom nanostructures, e. g., nanotext with letter height of  $\approx 5 \mu\text{m}$  and other nanostructures.

Both modes of operation, *holographic* and *lithographic*, usual for image-matrix machines, are present in this Originator and it is possible to switch between those two modes on-the-fly, during the hologram printing process. In holographic mode one can record holographic pattern using diffraction grating and microstructures with spatial frequency range of 700–1400 lines per mm. Security holograms with most of the traditional visual and security features and effects can be recorded in this operation mode. In lithographic mode one can record various special design and/or security effects, such as images composed of symmetric or blazed grating with low frequency 1–500 l/mm, Fresnel lenses, etc. Table 1 summarizes all main diffractive effects producible with Blue Phoenix IMP-6 Originator.

The Originators hardware assures the following Image-Matrix exposure parameters:

- Holographic micro-frame size for Direct Write exposure —  $225 \times 126 \mu\text{m}$
- Size of the Elementary hologram in micro-frame — from  $1 \times 1 \mu\text{m}$
- Elementary holograms density — up to 26,000 elementary holographic pixels per inch.
- Graphic resolution up to 210,000 dpi

### 2.2. Blue Phoenix DIWO-6 — Direct Write Originator

This Originator employs the Direct-Write hologram imprinting advanced by Geola from 1999. The process was previously described by us in details [1–4], so here we just briefly mention its main principle and its difference from Image-matrix process. But it is worth to point out that it is the only process allowing quick origination of a hologram containing deep animated 3D image of real and/or virtual scene, in true colour or achromatic. Pulsed lasers employment makes this Originator the quickest on the market. Holographic frames (hogels or holopixels), produced by this originator, are the smallest on the market — only  $100 \times 100 \mu\text{m}$ .

Direct deep 3D hologram writing is happening by recording one by one its elemental parts. So the resulting hologram, just as a hologram originated with Image- or dot- matrix originators consists from ensemble of elemental parts — Figure 1.

Each elemental part (called hogel, or holopixel) is essentially a holographic optical element. Like conventional pixel that is digital image element, holopixel is element of 3D image. The difference between holopixel and pixel is that pixel is seen as being the same from all viewing angles and holopixel is seen differently from different viewing angles. Similarly acts any particular element of conventional analogue hologram — from different view-

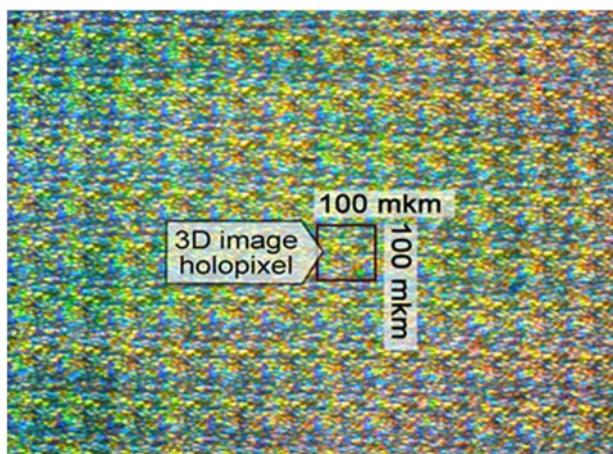


Fig. 1. Microphotographs of embossed 3D image hologram originated with Geola's DIWO-6 — Direct Write Originator

ing angles it seems different. Analogue hologram contains almost infinite number of such image elements, but since human eye has limitation in distinguishing smaller image elements, for their master-original printer Geola has chosen the size of image element (hogel) being  $100\ \mu\text{m}$ . To record hogel which would be seen differently from different viewing angles Geola is using the universal elemental hologram recording scheme shown in Figure 2.

The employed objective has focal point outside of its physical dimensions. Near focal spot, the beams have size almost equal to focal spot size and keep their directions. Adding reference beam, the hogel is recorded — a holographic optical element which illuminated will replay light beams into directions from where light beams came during its recording.

For hogel image generation we are using series of pixel taken from series of 2D images of 3D scene. Those 2D images are taken under different viewing angles. Hogel, while illuminated, replays all those 2D pixels into the said angles and the entirety of hogels replays series of 2D images into the said angles. Since we have two eyes — each of it sees the corresponding 2D image, our brain constructs the 3D scene and viewer perceives a 3D image. Since originated hologram of 3D object contains from 200 to 800 its perspective views, the viewer does not perceive any undesirable image switching effects, unless such effects are implemented into originated hologram on purpose.

Such holograms recording scheme allows one to quickly produce unique effects, not achievable with other originating techniques:

- colour deep 3D images;

Table 2. Effects producible with Geola's Blue DIWO-6 Originator

Graphical and security effects	Holographic Diffractive elements
- True holographic 3D images	- Color motion and kinetic motion
- Minimal imprinted text size — 0.7 mm	- True color 2D, True colour 2D/3D
- Hidden images — static and animated	- True color stereograms with 200–800 parallax views
	- Multilayer 2D/3D with unlimited number of layers

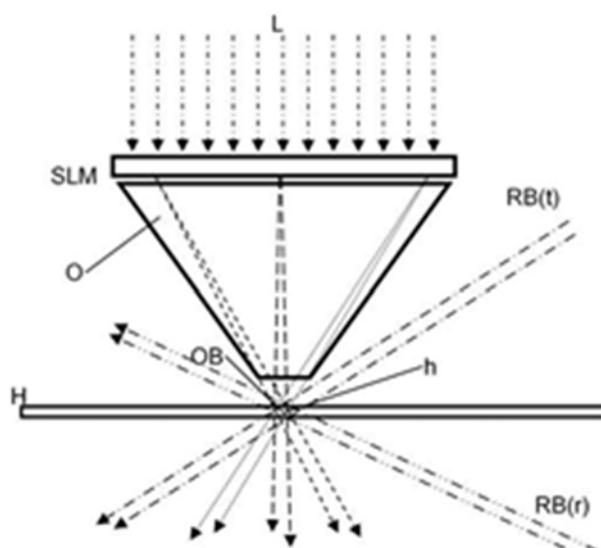


Fig. 2. Writing a hogel for a direct-write digital hologram. L is the laser beam, OB the object beam, RB(t) and RB(r) the reference beams for transmission and reflection holograms respectively; h is a hogel, H is the white-light reflection or transmission hologram

- achromatic deep 3D images;
- deep 3D images having some image parts as achromatic and some in true colour;
- achromatic and True Colour deep 3D images equally well viewable in front and back illumination.

In Table 2 are summarized all main diffractive effects producible with Blue Phoenix DIWO-6 Originator.

Technical characteristics of this Originator are as follows:

Resolution:

- Holographic micro-frame size  $100 \times 100\ \mu\text{m}$ ;
- Each holographic micro-frame contains 200–800 2D image pixels

Originating area:

- $152 \times 152\ \text{mm}$  ( $6'' \times 6''$ ) (Bigger areas available on request);

Originating speed:

- $1\ \text{cm}^2$  per 7 minutes with pulsed 30 Hz laser;
- $1\ \text{cm}^2$  per 3 minutes with pulsed 60 Hz laser.

### 2.3. IMP-6-DW Originator

The Blue Phoenix IMP-6-DW Originator can originate master-holograms containing deep holographic 3D images and all modern optical security features. This Originator has four operating modes — real 3D, holographic, lithographic and combined holo/litho mode with fully programmable switching between these modes during hologram origination.

### 3. Unique effects achievable with Geola's originators

#### 3.1. Materials used for master-originals

The positive photoresist plates were specially manufactured for Geola by coating an analogue of Shipley photoresist to glass pates in size of  $250 \times 200\ \text{mm}$  or  $300 \times 200\ \text{mm}$ . The coating was performed employing blade coating method. We prefer this coating method over

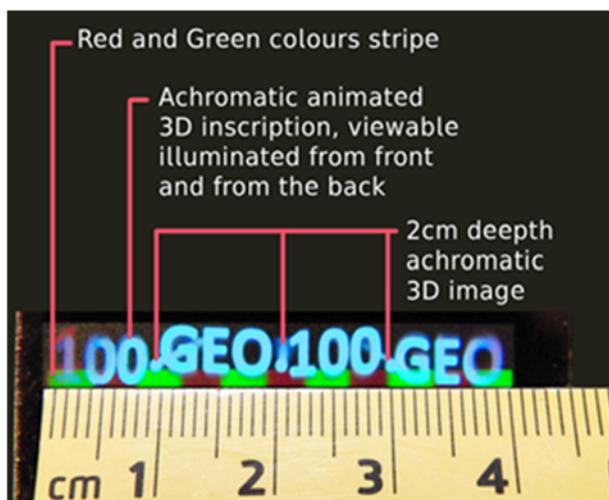
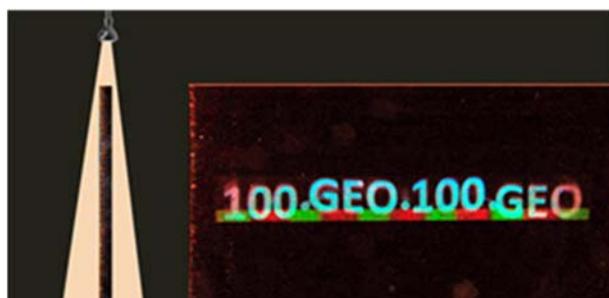


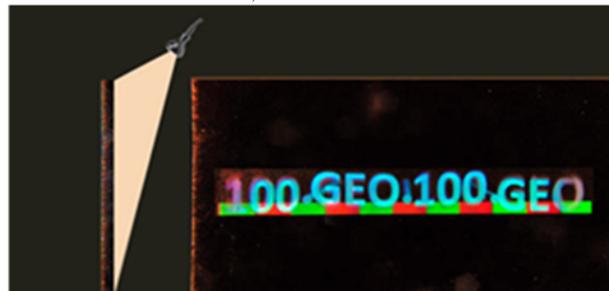
Figure 3. Photograph of the combined Achromatic-True Colour master-hologram on photoresist plate



a) from the top



b) from the front



c) from the back

Figure 4. Photograph of the combined Achromatic-True Colour master-hologram on photoresist plate illuminated from different directions

commonly used spin-coating because the photoresist layer is more uniform. Also this coating method produces thicker photoresist layer, which makes it more sensitive for pulsed and CW laser radiations. When we have started our journey into holograms recording on photoresist,

such plates were quite rare, but nowadays we even started to supply them to other holographers.

As photoresist developing agent we have used Microposit developer AZ303, diluted with deionized water in proportion 1:9. Developing time was 25–35 seconds. It is worth to note that photoresist plates also can be developed with 1.5 % KOH or NaOH solution. However, those chemicals remain in the developed relief and the thin layer of them is transparent. As a result, the holographic image looks great on photoresist, but as soon one will deposit silver on such a relief — silver enters into reaction with KOH or NaOH and the resulting silver relief is much shallower than the photoresist relief. Microposit developer AZ303 probably has some ingredients preventing developer's remains layer formation.

### 3.2. Unique holographic effects produced with DIWO-6 Originator

Below is the photograph of the one of the first combined Achromatic-True Colour master-hologram on photoresist plate recorded with DIWO-6 Direct-Write Originator. The hologram has animated achromatic inscription where texts “100” and “GEO” moves vertically in different directions while viewer moves the hologram from left to right. Also it contains the thin achromatic rods having depth of 2cm. At the same time, the hologram contains the true colour strip situated behind achromatic text elements, which adds very unique feature which, we believe, is not achievable with other master-hologram originating techniques. The only exception might be an e-beam technique, but it took our originator only 30 minutes to originate this 10 × 40 mm hologram.

Figure 3 shows another distinguishing feature achievable with our Originators — the hologram can be illuminated from front, top or from the back — the image clarity, shape and colour remain the same. Three direction “front” corresponds to the direction from where the reference beam came during the hologram recording.

### 3.3. Unique diffractive effects produced with IMP-6 Originator

The Originator is aimed at creating protective holograms of high complexity and, at the same time, it offers the maximum of opportunities to implement and combine hologram design ideas with its protective functions. Below we are briefly listing some of the distinctive features of the system, which are not found in the originators produced by other manufacturers.

In the holographic recording mode, along with diffraction gratings frequency and orientation angle modulation it is also possible to modulate their brightness by linearly changing the relief's depth. That allow to create various interesting effects — for example, to impose a high resolution grayscale image on any other holographic effects including kinetic ones. In both, holographic mode and lithographic modes, it is possible to compose any kind of a holographic image by using 2D diffraction gratings. Such type of microstructures has a very wide diffraction angle and creates a great visual impression.

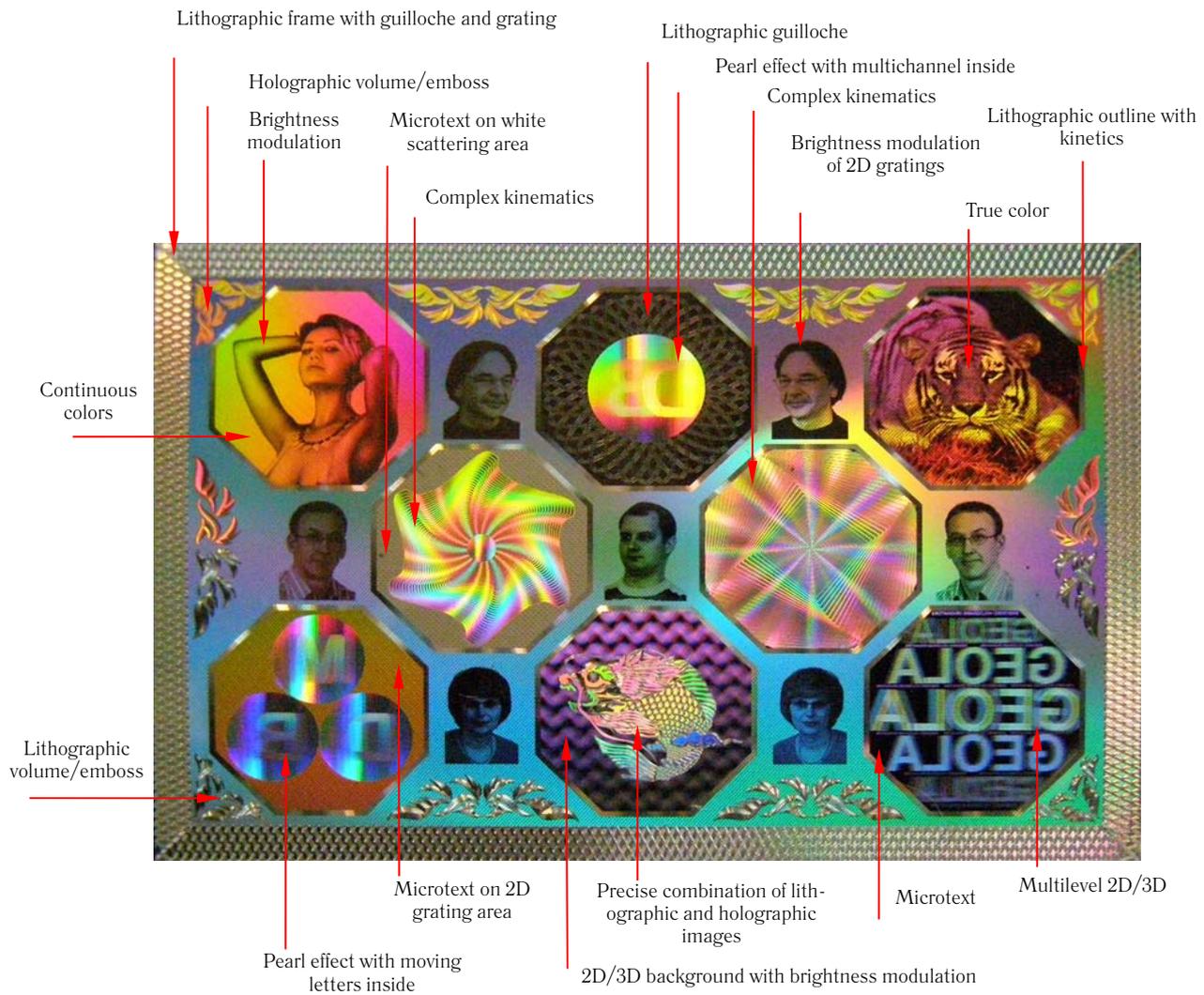


Fig. 5. Photograph of the Nickel shim produced from the master-hologram on photoresist plate recorded with IMP-6 Originator

Modulation of frequencies and orientation angle of these microstructures is also possible — that allows one to create complex color and kinetic effects. In addition, we have realized brightness modulation effect for 2D gratings in the holographic mode of system operation. A hologram designer can easily experiment and creates own unique visual effects by filling the elementary hologram in micro-frame with custom microstructures. This possibility is available in both, holographic and lithographic, recording modes.

A lot of additional unique possibilities are realized in the lithographic mode of operation. For example, it is possible to easily compose any image from achromatic (low frequency  $0-500 \text{ mm}^{-1}$ ), symmetric or even saw tooth gratings. Possibility to modulation frequency and angle for such type of microstructures is also realized. There are also three calculation modes to produce a free-form lens effect, also known as engraving or achromatic volume. Each of the modes gives unique properties to the visual representation of the object.

The true color effect in holographic mode is realized by four calculation methods based on different mathematical models. It always allows finding a compromise between the brightness of the image, its resolution and accuracy of colors representation.

In the system's software, we have also realized several proprietary utilities for synthesizing such popular diffractive effects as Fresnel lenses, symmetrical or asymmetric hidden images, floating objects and some others. Below is the photograph of the Nickel shim produced from the master-hologram on photoresist plate recorded with IMP-6 Originator.

#### 4. Conclusions

We have developed a series of unique master-hologram originators combining the Direct-Write and Image-Matrix holograms originating techniques

Our originator produces some unique optical effect hardly reproducible with other master-holograms Originators.

### References

- [1] **Zacharovas, S.** Effective public security features for embossed holograms / S. Zacharovas, R. Bakanas, A. Bulanovs, V. Varadarajan // Proceedings of SPIE: Practical Holography XXXI: Materials and Applications. — Vol. 10127. — P. 1012702. — DOI: 10.1117/12.2248904
- [2] **Saxby, G.** Practical Holography / G. Saxby, S. Zacharovas. — Fourth Edition. — Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015, P. 359–363. — ISBN 9781482251579.
- [3] **Zacharovas, S.** Master-holograms recorded with pulsed laser on photoresist / S. Zacharovas, D. Adliene, R. Bakanas, R. Šeperys; P. Narmontas // Proceedings of SPIE: Practical Holography XXVIII: Materials and Applications. — Vol. 9006. P. 900605. — DOI: 10.1117/12.2044365.
- [4] **Bakanas, R.** Comparison of diffraction patterns exposed by pulsed and CW lasers on positive-tone photoresist / R. Bakanas, V. Jankauskaite, A. Bulanovs, S. Zacharovas, A. Vilkauskas // Applied Optics. — 2017. — Vol. 56. — № 8. — P. 2241–2249.

## 2.6. Новые подходы для защиты информации с помощью комбинированных поляризационных элементов с верификационной составляющей

*А. И. Горчарук, П. В. Моисеенко, Л. В. Танин, А. Г. Бобореко, М. Н. Луциков, В. В. Еверкин*  
ЗАО «Голографическая индустрия», Минск, Беларусь

При рассмотрении современных защитных средств, используемых в целях защиты документов, товаров и информации наиболее передовыми на сегодняшний день являются оптические методы.

В данном докладе рассматривается способ защиты от подделки и проверки подлинности ценных, многостраничных документов, например, паспортов за счет включения в страницы оптических защитных элементов, несущих скрытое изображение, невидимое в естественном свете невооруженным глазом и визуализируемое при наблюдении его с помощью простейших устройств, встроенных в защищаемый объект.

В настоящее время для защиты от подделки и в качестве знаков подлинности используются (помимо различных средств полиграфической защиты) средства защиты и знаки идентификации подлинности, встроенные в защищаемое изделие в виде прозрачного или полупрозрачного окна, несущего один или несколько защитных признаков, таких как различные видимые изображения, цветопеременный эффект в проходящем и отраженном свете, дифракционные, голографические и другие оптические эффекты. Среди защитных элементов с переменными оптическими свойствами, наиболее трудно воспроизводимыми являются элементы, содержащие скрытые изображения, видимые только в определенных условиях освещения или при использовании специальных приборов.

В литературном источнике [1] приводится пример прозрачного окна в бумажной банкноте. Специалисты G&D предложили новый элемент TWIN, который является сочетанием окна в бумаге, офсетной и металлографской печати. В зависимости от цвета фона (светлый или темный) в прозрачном окне видны разные рисунки. Применительно к демонстрационной банкноте — это образ лебедя или цифра «8». На новой демонстрационной банкноте компании прозрачное окно выполнено путем вырубки отверстия с последующим заклеиванием пластиковой полосой. Такое решение позволяет разместить на полосе голографические изображения.

В работе [2] описан защитный документ с прозрачными окнами с микролинзами и возможностью приводиться в перекрывающееся взаимное расположение друг с другом. В результате перекрывания вызываются оптические эффекты, которые зависят от расстояния между взаимно перекрывающимися окнами и их положением.

В работе [3] реализован ценный документ, представляющий собой структуру из нескольких страниц в виде паспорта или подобного документа, содержащего защитный элемент, используемый в виде прозрачного

окна в странице указанного документа, при этом защитный элемент представляет собой прозрачный носитель, имеющий две рабочие стороны и сформированные на каждой из указанных сторон скрытые изображения, а также два отражательных элемента, расположенных на страницах, смежных со страницей, с прозрачным окном, несущим скрытые изображения. При этом указанные отражательные элементы скомпонованы таким образом, что обеспечивают отдельную визуализацию скрытых изображений, расположенных на обеих рабочих сторонах защитного элемента. При этом прозрачный носитель представляет собой тонкопленочный поляризатор [3].

Документ с защитой информации, представленный в данном докладе, включает по меньшей мере, два листа. Поляризатор установлен в окне, локализованном в отдельной области одного листа документа, находящегося в непосредственном контакте со сторонами других листов, содержащих скрытые изображения. Данные скрытые изображения сформированы за счет оптически анизотропных участков, расположены в оптически изотропной тонкопленочной основе, закрепленной с помощью клеевого состава на отражательных элементах. Лист документа с поляризатором ламинирован с обеих сторон оптически изотропным, лазерночувствительным поликарбонатом. Кроме того, поляризатор, дополнительно снабжен, с одной либо с двух сторон, четвертьволновой фазовой пластиной, а четвертьволновая фазовая пластина может быть установлена с возможностью частичного перекрытия поляризатора.

В качестве отражательного элемента в предлагаемом защитном элементе может быть использована краска, содержащая металлические частицы, а также позолотная фольга, дифракционная фольга, голограмма.

Отличия данного способа защиты от вышеперечисленных существующих защитных элементов заключаются в следующем.

В окне размещают только тонкопленочный поляризатор, который может быть снабжен четвертьволновыми фазовыми пластинами, которые переводят его из линейного в циркулярный поляризатор, а слой со скрытой информацией формируют в тонкопленочной основе, которую закрепляют на отражательном элементе. При таком способе реализации уменьшается толщина установленного в окне элемента по сравнению с вышеперечисленными методами, а самое основное — появляется возможность использования поликарбонатной страницы, с последующей ее персонализацией переменными данными конкретного субъекта с помощью специального лазера. При этом оптически

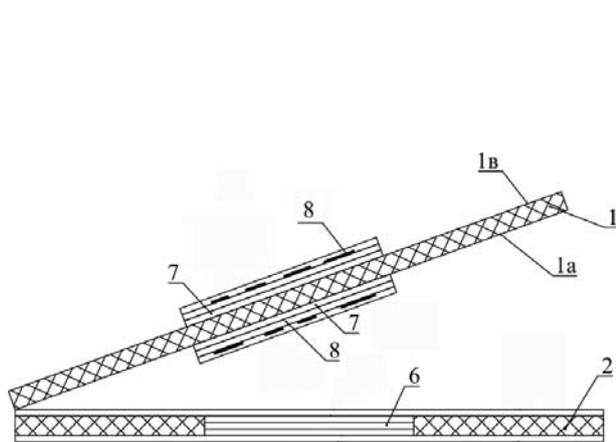


Рис. 1.

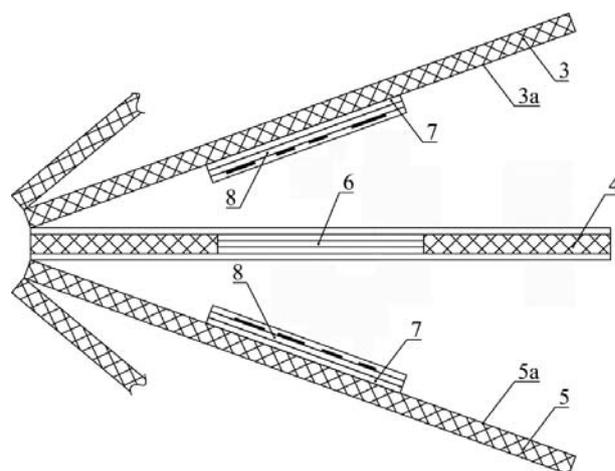


Рис. 2.

изотропный поликарбонат не влияет на изменение поляризационных свойств проходящего через него света.

Одновременно с заполнением поликарбонатной страницы в тонкопленочной основе, которая в целом оптически изотропна, формируют оптически анизотропные участки со скрытой информацией, например, также фотографию получателя данного документа или другую переменную информацию. Тонкопленочная основа со скрытой фотографией, переменной информацией конкретного субъекта закрепляется на отражательных слоях и визуализируется при необходимости наложением поляроида, встроенного в поликарбонатную страницу.

А использование четвертьволновой фазовой пластины с одной стороны поляризатора позволяет одну и ту же скрытую информацию визуализировать в различных изображениях.

Частичное перекрытие поляризатора четвертьволновой фазовой пластиной, например, 50 % с соответствующим расположением скрытой информации на тонкопленочной основе и закреплении на отражательном элементе позволяет получать при

визуализации дополнительные эффекты, что усиливает защищенность документа.

На рисунках 1 и 2 схематически изображена техническая реализация данного метода защиты документов.

На рисунке 1, показан рисунок реализации метода при наличии в документе двух листов. Это лист 1 со страницами 1а и 1в и лист 2.

На рисунке 2, приведен рисунок реализации метода при наличии в документе трех и более листов. Обозначены лист 3 со страницей 3а, лист 4 и лист 5 со страницей 5а.

В листе 2 (рисунок 1) или в листе 4 (рисунок 2) выполнено окно, в которое вставлен тонкопленочный поляризатор 6.

На страницах 1а и 1в листа 1, на странице 3а листа 3 и на странице 5а листа 5, напротив окон с поляризатором 6, расположены одинаковые по строению многослойные образования, состоящие из отражательного элемента 7, на котором расположены оптически анизотропные участки 8.

#### Список источников

- [1] Корнилов, Г. Это деньги завтрашнего дня / Г. Корнилов // Водяной знак. — 2007. — Том 55. — № 11. — С. 15.
- [2] Патент № 2 376 642 РФ. Защитный документ с прозрачными окнами / А. Шиллинг, У. Р. Томпкин. — № 2007 114 066; заяв. 07.09.2005.
- [3] Патент № 014 380 EA. Оптический защитный элемент, способ его изготовления и устройство верификации и самоверификации / А. Л. Карасев, А. В. Ванников, Л. Г. Карасева. — № 2010 000 004; заявл. 21.01.2010.

## New approaches to protect information using combined polarization elements with a verification component

A. I. Gorcharuk, P. V. Moiseenko, L. V. Tanin, A. G. Boboreko  
Holographic Industry, Minsk, Belarus

## 2.7. Оптико-электронный сканер для оперативного контроля подлинности защитных голограмм на документах

И. К. Цыганов<sup>1</sup>, В. В. Колочкин<sup>1</sup>, В. Е. Талалаев<sup>1</sup>, Н. В. Пирютин<sup>1</sup>, С. Б. Одинокоев<sup>1</sup>, Е. Ю. Злоказов<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В статье представлен автоматический оптико-электронный сканер для оперативного контроля подлинности защитных голограмм на документах. Описаны алгоритм обработки данных, принцип его работы и конструкция. Использование современных систем сканирования, высокоскоростных устройств регистрации, специально рассчитанных и изготовленных компонентов оптической системы, а также применение корреляционных фильтров в алгоритме распознавания полученной с голограммы информации позволили значительно сократить время и повысить надежность процесса контроля подлинности защитных голограмм.

**Ключевые слова:** Защитные голограммы, Дифракционные защитные элементы, Голограммные защитные элементы, Контроль подлинности, Автоматический контроль.

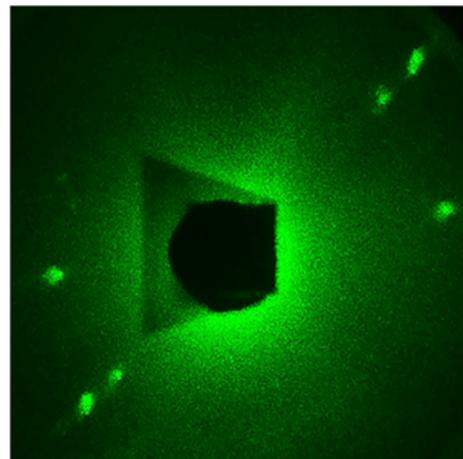
### Введение

В настоящее время голограммы широко используются в качестве одного из элементов защиты для различных документов: паспортов, водительских удостоверений, различных сертификатов и других продуктов защищенной полиграфии. В то же время индустрия поддельных голограмм развивается высокими темпами, и качество поддельных голограмм достигло такого уровня, что неквалифицированный потребитель нередко не может отличить оригинальную голограмму от поддельной. В этой связи появилась необходимость в приборах контроля подлинности голограмм. В настоящее время существуют приборы, реализующие такую функцию и работающие на разных принципах. Однако у них есть ряд недостатков, таких как: проверка подлинности только по одному признаку, необходимость в высококвалифицированном специалисте для управления и обработки результатов проверки, значительные времена, необходимые для проверки с высокой степенью достоверности результата, наличие субъективного человеческого фактора, влияющего на результат проверки. В настоящей статье предлагается автоматический оптико-электронный сканер для оперативного контроля подлинности защитных голограмм на документах, который лишен представленных выше недостатков.

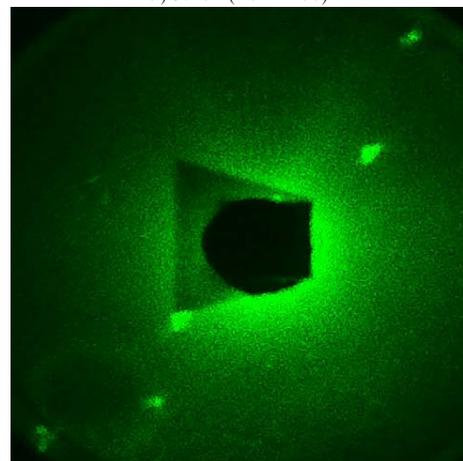
### 1. Анализ когерентных изображений защитных голограмм

Защитные голограммы (ЗГ), дифракционные и голограммные оптические защитные элементы (ДЗО-ГЗО) представляют собой сложные структуры с элементами разрешения имеющими размеры до десятых долей микрометра. В общем случае ЗГ содержат в себе области с дифракционными решетками, параметры которых (период и пространственная ориентация) отличны. Если подсветить голограмму когерентным излучением, то оно дифрагирует на элементах ЗГ, в результате чего можно наблюдать картину дифракционного распределения или другими словами когерентное изображение защитной голограммы.

Метод анализа когерентных изображений защитных голограмм заключается в корреляционном распознавании изображений пространственного распределения интенсивности лазерного излучения, дифрагировавшего на участках ЗГ. В случае наличия на освещённом элементе пикселей голограммы, которые представляют собой дифракционные решётки с разной частотой и ориентацией, в когерентном излучении будут наблюдаться нулевой порядок, а также симмет-



а) зона 1 (истинное)



б) зона 2 (ложное)

Рис. 1. Примеры типичных изображений картины дифракции для различных зон защитной голограммы

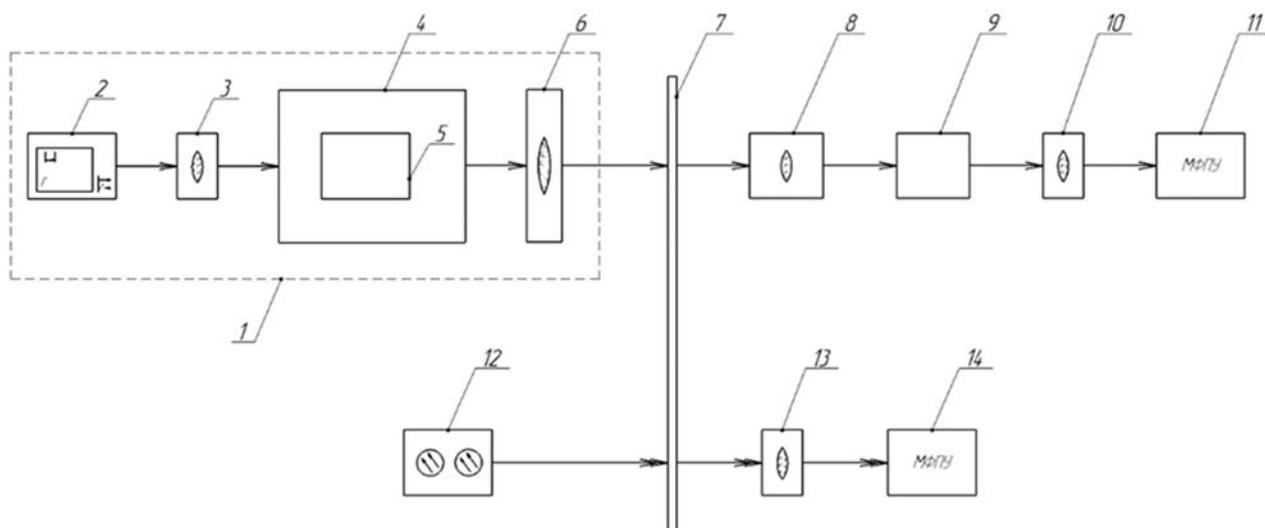


Рис. 2. Функциональная схема опико-электронного сканера защитных голограмм

рично отстоящие от него пары дифракционных порядков. Направление и расстояние отклонения этих максимумов от нулевого порядка соответствуют ориентации и частоте решёток, присутствующих на освещённом элементе. Примеры тестовых сигналов представлены на рисунке 1.

Расчёты авто- и кросс-корреляций представленных изображений показали, что наличие нулевого порядка делает подобные сигналы корреляционно похожими друг на друга, несмотря на различное расположение дифракционных пиков. Для устранения этой проблемы необходимо исключить нулевой порядок, предварительно обработав входные изображения.

Суть метода корреляционного распознавания заключается в вычислении двумерной корреляционной функции между изображениями от входного и от эталонного объектов. По характеристикам результирующего корреляционного распределения, а в частности по наличию или отсутствию корреляционного пика, его локализации, интенсивности и ширине делают вывод о принадлежности входного объекта к классу эталонного. Существенной проблемой корреляционного метода является его неустойчивость к шумам и помехам входного изображения. Для адекватного распознавания необходимо, чтобы корреляционный пик обладал характеристиками, достаточными для выделения его на фоне всего выходного распределения, которое может включать в себя ложные корреляционные пики и шумы различной природы. Ложные корреляционные пики могут появиться как следствие корреляции эталона с ложными объектами. Наличие шумов во входной плоскости может привести к снижению точности локализации интересующего объекта в плоскости входного изображения. Наравне с этим, метод корреляционного распознавания не устойчив к возможным искажениям самого изображения эталонного объекта. Применение в качестве эталона математически синтезированных инвариантных корреляционных фильтров (далее КФ), содержащих информацию как об эталонном объекте, так и об его возможных искажениях, позволяет в той

или иной степени избавиться от перечисленных недостатков.

## 2. Функциональная схема опико-электронного сканера защитных голограмм

На рисунке 2 представлена функциональная схема опико-электронного сканера. Оптическая система сканера состоит из двух каналов, канала контроля (измерительного канала) и канала наведения. Канал контроля осуществляет формирование и регистрацию фурье-спектра объекта исследования при освещении монохроматическим когерентным излучением. Канал наведения представляет собой оптическую систему формирования изображения объекта в видимом диапазоне для наведения излучения измерительного канала на заданную точку объекта.

Канал контроля состоит из двухкоординатной сканирующей системы подсветки 1, содержащей лазерный диод 2, коллимирующий объектив 3, зеркальную систему сканирования 4, включающую в себя в том числе 2 гальванометрических сканатора 5, и дополнительной линзовой системы переноса зрачка 6, контролируемого объекта 7, фурье-преобразующей системы 8, визуализатора 9, репродукционного объектива 10 и многоплощадочного фотоприемного устройства (устройства регистрации) 11.

Канал наведения состоит из матрицы светодиодов 12 для подсветки контролируемого объекта 7, проекционного объектива 13 и многоплощадочного фотоприемного устройства (устройства регистрации) 14.

В канале контроля лазерный диод с коллимирующим объективом формируют параллельный лазерный пучок света, который проходя через зеркальную систему, во входном и выходном зрачках которой устанавливаются сканирующие зеркала, дополнительную систему переноса зрачка и фурье-преобразующую систему падает на контролируемый объект, дифрагируя на его поверхности. Зеркала, закрепленные на гальванометрических сканаторах позволяют разворачивать



а) фотография сканера ЗГ  
без декоративных стенок

б) фотография сканера ЗГ  
в сборе (открытая крышка)

б) фотография сканера ЗГ  
в сборе (открытая крышка)

Рис. 3. Фотография экспериментального образца опико-электронного сканера защитных

зондирующий лазерный луч по контролируемому объекту с большой скоростью. Дифрагированный свет, проходя через фурье-преобразующую систему, формирует на матовой поверхности диффузора фурье-спектр исследуемой на объекте точки (области малого размера). Далее фурье-спектр перепроецируется с помощью репродукционного объектива в плоскость многоплощадочного фотоприемного устройства, регистрируется и передается на обработку в компьютер.

В канале наблюдения регистрируется изображение исследуемой голограммы целиком. По полученному изображению производится привязка голограммы к системе координат сканера. На этом этапе происходит первичное сравнение изображения исследуемой голограммы с эталонной и в случае полного несовпадения делается вывод об ее фальсифицированности. В случае обнаружения опорных объектов, совпадающих с эталонными, в результате привязки из базы данных загружается информация об эталонных фурье-спектрах в предполагаемых точках контроля. В дальнейшем эта информация используется при корреляционном сравнении с изображениями фурье-спектра, полученными в канале контроля.

### 3. Экспериментальный образец опико-электронного сканера защитных голограмм

Созданная функциональная схема легла в основу разработки принципиальной оптической и электрической схем опико-электронного сканера защитных голограмм. На основе оптической схемы была разработана и выпущена конструкторская документация (КД) на опико-электронный сканер защитных голограмм.

Для создания экспериментального образца опико-электронного сканера защитных голограмм в соответствии с разработанной КД были изготовлены и

закуплены оптические, опико-электронные, электронные, механические детали, узлы и блоки, входящие в его состав. Большинство оптических и механических компонентов отечественного и белорусского производства. Опико-электронные и электронные узлы также разработаны и изготовлены российскими фирмами-разработчиками, но с преимущественным использованием зарубежных комплектующих.

Далее были проведены сборка, настройка и юстировка экспериментального образца опико-электронного сканера защитных голограмм, фотографии которого приведены на рисунке 3.

В ходе проведения работы были проведены испытания сканера по следующим параметрам:

- вероятность идентификации ЗГ;
- время идентификации ЗГ и
- размер ложементов для документов сканера.

Испытание времени и вероятности идентификации документов проводилось на четырёх типах документов:

- паспорт РФ;
- загранпаспорт старого образца (ЗПСО);
- загранпаспорт нового образца (ЗПНО);
- водительское удостоверение (ВУ).

Время и вероятность идентификации определялись по всем четырём типам документов отдельно. При этом по каждому типу документов было выполнено по 20 испытаний, на основе которых рассчитывались вероятность идентификации и максимальное время идентификации.

Результаты предварительных испытаний основных характеристик опико-электронного сканера ЗГ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры оптико-электронного сканера ЗГ

№	Наименование параметра	Номинальное значение	Измеренное значение
4	Проверка времени идентификации паспорта РФ	60 с	56 с
5	Проверка вероятности идентификации паспорта РФ	90 %	95 %
6	Проверка времени идентификации ЗПНО	60 с	58 с
7	Проверка вероятности идентификации ЗПНО	90 %	100 %
8	Проверка времени идентификации ЗПСО	60 с	33 с
9	Проверка вероятности идентификации ЗПСО	90 %	95 %
10	Проверка времени идентификации ВУ	60 с	46 с
11	Проверка вероятности идентификации ВУ	90 %	95 %

Измеренные значения укладываются в желаемых диапазонах. Время идентификации всех документов составляет менее 1 минуты и вероятность идентификации составляет более 90 %.

## Заключение

В заключении хочется выделить следующие основные конструкторские и программные решения, реализованные в автоматическом оптико-электронном сканере для оперативного контроля подлинности защитных голограмм на документах. В конструкции сканера использованы гальванометрические сканаторы. Их применение позволило значительно снизить время, необходимое для контроля защитной голограммы с размерами паспортной страницы. Использование высокоскоростного устройства регистрации также привело к снижению времени контроля. Специально рассчитанные и изготовленные компоненты оптической системы повысили качество регистрируемых картин дифракционного распределения, что снизило ошибки при проведении контроля подлинности. Отсутствие подвижных элементов в сканере, кроме сканирующих зеркал повысило точность позиционирования зондирующего пучка на исследуемом образце, что в свою очередь повысило вероятность правильной идентификации защитной голограммы, а также механическую надежность прибора в целом. Применение корреляционных фильтров в алгоритме распознавания полученной с голограммы информации также повысило надежность процесса контроля подлинности.

## Opto-electronic scanner for operational control of security holograms authenticity on documents

I. K. Tsyganov<sup>1</sup>, V. V. Kolyuchkin<sup>1</sup>, V. E. Talalaev<sup>1</sup>, N. V. Piryutin<sup>1</sup>, S. B. Odinkov<sup>1</sup>, E. Y. Zlokazov<sup>1 2</sup>

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

<sup>2</sup> National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

The paper presents an automatic opto-electronic scanner for operational control of security holograms authenticity on documents. The algorithm of data processing, operation principle of scanner and its design are described. The use of modern scanning systems, high-speed recording devices, specially designed and manufactured components of the optical system, as well as the use of correlation filters in the algorithm for recognizing the information received from the hologram, significantly reduced the time and reliability of the security holograms authenticity control process.

**Keywords:** Security holograms, Diffraction security elements, Holographic security elements, Authenticity control, Automatic control.

## 2.8. Непосредственная запись голограмм на металле

А. В. Шурыгин, А. Ф. Смык  
ООО «Дотрикс», Москва, Россия

Непосредственная запись голограмм на металле имеет несколько преимуществ по сравнению с записью на промежуточных регистрирующих средах. Наиболее интересные из них:

- защитная маркировка производится на самом изделии, минуя этикетки;
- размер голограммы не ограничен размерами среды, что особенно актуально для записи трекограмм или «серых» голограмм;
- возможность быстрого варьирования изображения или неудаляемой маркировки;
- профиль полосы формируется прямо на изделии и не подвержен уже влиянию технологических факторов.

При непосредственной записи интерференционная картина формируется прямо на поверхности изделия и воздействие на нее отличается в максимумах и минимумах. Пространственное разрешение равно размеру пятна и составляет обычно не более 2 000–

3 000 dpi. Таким образом, в системах непосредственной записи реализуется схема интерференционного дот-матрикса (рисунок 1), и диапазон защитных элементов ограничен 2D голограммами, микротекстами и скрытниками. Исключение составляют трекограммы и «серые» голограммы, формирующие впечатление объемности объекта.

Поскольку характер взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом носит сугубо нелинейный, а часто пороговый характер [2], особое значение приобретает однородность засветки пятна. Для выравнивания распределения интенсивности по пятну был применен рефракционный корректор  $\pi$ -shaper-6-6 [3]. Полученное на его выходе распределение интенсивности приведено на рисунке 2, а фото полученной таким образом голограммы — на рисунке 3. Частота полос — 275 л/мм, профиль полос — на рисунке 4.

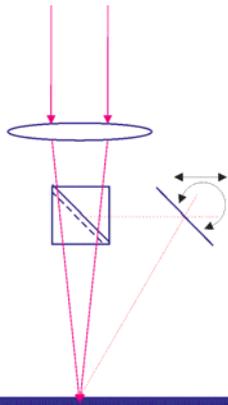


Рис. 1. Схема интерференционного дот-матрикса

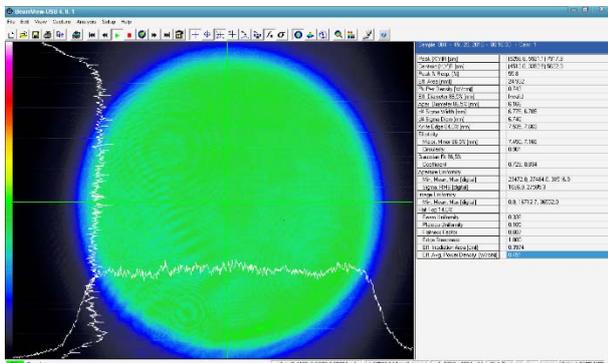


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения в пятне



Рис. 3. Фотоголограммы

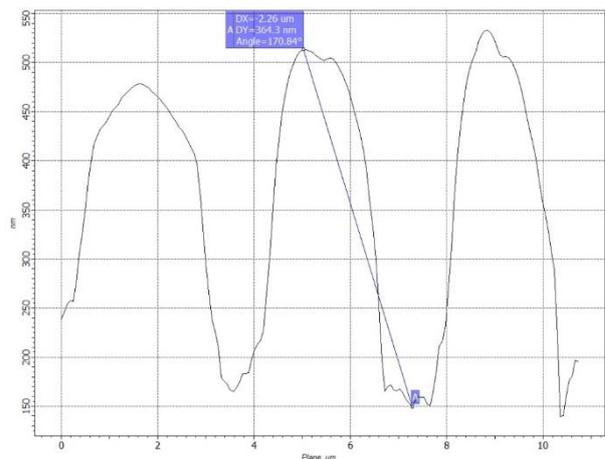


Рис. 4. Профиль полос

### Список источников

- [1] Lasagni, A. F. Laserinterferenzstrukturierung — Hochpräzise bei Höchstgeschwindigkeit / A. F. Lasagni // Proc. of Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik. — 2015. — P. 232–245.
- [2] Смирнов, Б. М. Энергетические процессы в макроскопических фрактальных структурах / Б. М. Смирнов // УФН. — 1991. — Том 161. — № 6. — С. 171–201.

- [3] **Laskin A.** Building beam shaping optics for micromachining / A. Laskin, V. Juzumas, A. Urniežius, V. Laskin, G. Šlekys, et al. // Proceedings of SPIE: Components and Packaging for Laser Systems. — 2015. — Vol. 9346. — P. 934615.

## Direct hologram recording in metals

*A. F. Smyk, A. V. Shurygin*  
Dotrix, Moscow, Russia

Direct holographic recording gives several important advantages. Among them: security features are placed on the surface of a product without labels, seals, etc., image size is not limited by recording medium, one can quickly vary image or coding or numbering, relief is formed just on the product surface and any technological factor has no effect. Interference pattern appears just on the surface of a product and interacts with it differently at peaks and minima. Spatial resolution doesn't exceed 2,000–3,000 dpi normally. So, direct recording realizes dot-matrix ideology of interference type (Fig. 1), and security features are limited by 2D holograms, microtexts and covered images. Treograms and «grey» holograms are pleasant bonuses, giving a 3D impressions. High power laser light interaction with a medium is substantially non-linear process and it often has a threshold [2]. That is why the beam uniformity is of great importance. The beam shaper  $\pi$ -shaper-6-6 [3] was applied to make intensity distribution more uniform. See Fig. 2. Fig. 3 shows a photo of 2D hologram obtained. Hologram fringes spatial frequency is 275 l/mm, while fringes profile is shown at Fig. 4.

## 2.9. Разработка метода формирования многоцветных изображений, восстановленных с защитных голограмм

Л. А. Найден, И. К. Цыганов, Е. А. Дроздова, С. Б. Одинокоев

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

В работе рассматриваются голограммы, изготовленные по технологии Dot-Matrix, которые содержат дифракционные решетки с различными периодами и ориентациями. Исследуются и анализируются различные методы расчета параметров таких дифракционных решеток. Исходные данные для расчета получаются из графического файла, содержащего входное изображение. Анализ проводится, исходя из степени соответствия цвета, получаемого от голограммы, цвету входного изображения. Рассмотрены методы расчета параметров голографического пикселя с использованием цветовой диаграммы Международной Комиссии по освещенности (МКО) и метод с использованием колориметрической системы RGB.

**Ключевые слова:** Дифракционные решетки, Цветные голограммы, Цветовая диаграмма, Dot-Matrix; Колориметрическая система.

### Введение

В результате расчета цветных голограммных изображений мы должны получить набор дифракционных решеток, воссоздающих цвет в пикселе голограммы, максимально приближенный к цвету в соответствующем пикселе входного изображения. Среди искоемых параметров выделяют следующие [1]:

- 1) период голографической дифракционной решетки;
- 2) угловая ориентация голографической дифракционной решетки;
- 3) параметры рельефа — глубина и вид профиля.

### Методы расчета параметров голографического пикселя

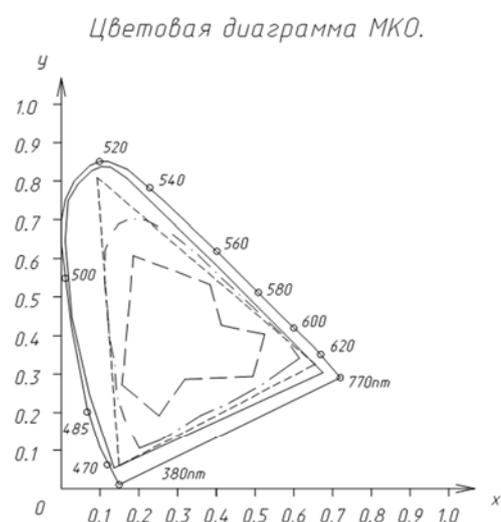
Период голографической дифракционной решетки определяет длину волны излучения, дифрагировавшего от источника белого света. Угловая ориентация определяет угол поворота пластинки с голограммой при восстановлении определенного рисунка. Соответственно меняя ориентации можно добиться плавного изменения изображения при повороте голограммы. Параметры рельефа: а именно глубина и вид профиля, которые определяют яркость излучения, дифрагированного от конкретного пикселя. Помимо глубины и вида профиля, яркость излучения можно изменить площадью занятой дифракционными решетками при сохранении параметров рельефа.

Описанные выше параметры дифракционных решеток достаточно легко могут быть описаны в колориметрической системе HSB, где период дифракционной решетки соответствует координате Hue (цветовой тон), а яркость дифрагированного излучения соответствует координатам Saturation (насыщенность) и Brightness (яркость)

Исходное изображение для радужных голограмм в большинстве случаев создается при помощи графических редакторов на компьютере. В результате получается растровый файл, в котором изображение представлено в виде конечного набора пикселей [2]. Графический пиксель формируется несколькими точками с дифракционными решетками, расположенными на очень малом расстоянии друг от друга. Воспринимаемый цвет пикселя определяется лучами света, идущими

в направлении наблюдателя в результате дифракции на различных дифракционных решетках. Пиксели содержат информацию о цвете, описанную в колориметрической системе RGB. Известны формулы для преобразования цветовых координат между колориметрическими системами HSB и RGB. Этот факт позволяет нам осуществлять расчет параметров голографических дифракционных решеток по данным из входного графического файла.

Хотя получение цвета, используя систему RGB, широко применяется во многих областях, и RGB-система может быть использована для передачи широкого диапазона цветов, она все равно не может охватить все возможные цвета на диаграмме МКО. Для того чтобы избавиться от этого недостатка и полностью



- Граница реальных цветов.
- Диапазон цветопередачи в системе RGB.
- Диапазон цветопередачи цветных фотопленок.
- - - Диапазон цветопередачи печатающих устройств.
- Диапазон цветопередачи полноцветных дифракционно-оптических структур и голограмм.

Рис. 1. Цветовая диаграмма МКО (система XYZ)

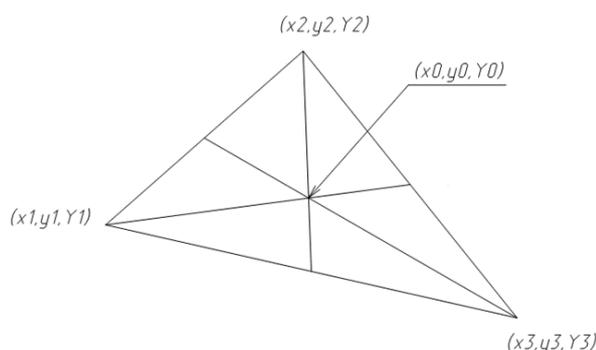


Рис. 2. Формирование цвета в точке, находящейся внутри треугольника с вершинами, заданными тремя дифракционными точками

задействовать возможность цветопередачи с помощью дифракционных решеток, будем использовать метод воссоздания цвета в колориметрической системе МКО (1931). Сравнить цветовые диапазоны обеих цветковых диаграмм можно на рисунке 1.

Любые три различные дифракционные точки, представляющие три различные длины волн, могут сформировать любой цвет в пределах диаграммы МКО.  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  — это цветовые координаты, вершины треугольника в котором формируется цвет. По теории МКО как показано на рисунке 2, требуемый цвет, это цвет имеющий координаты  $(x_0, y_0)$  и интенсивность  $Y_0$  обозначенный  $[(x_0, y_0), Y_0]$ . Три выбранные точки имеют следующие координаты  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ . Интенсивность дифрагированного на этих трех точках света обозначим как  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$ . Тогда зная координаты этих самых точек, через не сложные вычисления можно прийти к определению необходимой координаты.

### Литература

- [1] Magnusson, R. Diffraction efficiencies of thin phase gratings with arbitrary grating shape / R. Magnusson, T. K. Gaylord — J. Opt. Soc. Am. — 1978. — Vol. 68. — № 6. — P 87–93.
- [2] Патент № 5 262 879 USA. Holographic image conversion method for making a controlled holographic grating / S. D. Frank. — Оpubл. 1993. — 7 p.

## Investigation of methods for the formation of multicolored images reconstructed with protective holograms

L.A. Nayden, I.K. Tsyganov, S.B. Odinkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The work deals with holograms created using Dot-Matrix technology, which contain diffraction gratings with different periods and orientations. Various methods for calculating the parameters of diffraction gratings with different periods and orientations are investigated and analyzed. The input data for the calculation, obtained from a graphic file containing the input image. The analysis is carried out, proceeding from the degree of correspondence of the color obtained from the hologram to the color of the input image. Methods for calculating holographic pixel parameters using the International Illumination Commission (ICI) color chart and the method using the RGB colorimetric system are considered.

**Keywords:** Diffraction gratings, Colored holograms, Color chart, Dot-Matrix, Colorimetric system.

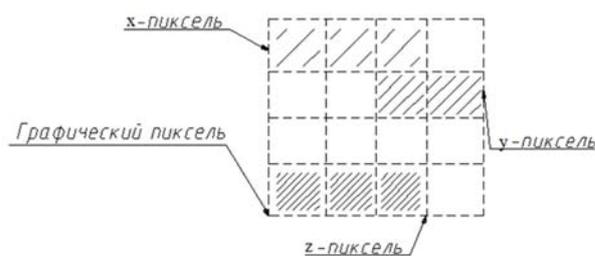


Рис. 3. Схематическое представление графического пикселя с разной интенсивностью составляющих его элементов

Интенсивность дифрагированного излучения, показанного на рисунке 3, зависит от количества точек с дифракционными решетками, чем больше точек, тем больше интенсивность, а, следовательно, и яркость пикселя.

Требуемое количество точек каждого ранее определенного цвета зависит от геометрического расстояния на цветовой диаграмме МКО между требуемым цветом и тремя основными цветами. В данном случае интенсивность отраженного света соответствует количеству используемых для представления основного цвета точек.

### Заключение

Выбрав достаточное количество дифракционных точек, создающих цвета близкие к границе цветовой диаграммы МКО, можно легко воссоздать практически все цвета, расположенные внутри диаграммы путем комбинации различных дифракционных пикселей. Представление изображения в системе МКО позволяет обеспечить больший цветовой спектр, чем RGB.

## 2.10. Оптический энкодер на основе четырёхсекционной дифракционной решётки

*А. Ю. Жердев, М. В. Шишова, Д. С. Лушников, С. Б. Одинокоев, В. В. Маркин*

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

Оптический энкодер включает в себя закреплённую подвижную дифракционные решётки. Лазерное излучение проходящее и дифрагирующее на этих двух решётках создаёт интерференционный сигнал на приёмнике излучения. Декодирование фазы интерференционного сигнала позволяет определить текущее смещение решёток друг относительно друга. Известные оптические энкодеры используют несколько точно съюстированных оптических каналов, включающих приёмники чтобы получить сигналы с различной фазой для повышения разрешения энкодера. Мы предлагаем использовать для решения этой задачи один оптический канал с многосекционной анализирующей дифракционной решёткой для упрощения оптической схемы и снижения требований к юстировке. Оптическая схема энкодера на основе четырёхсекционной анализирующей дифракционной решётки разработана и описана в данной статье.

**Ключевые слова:** Оптические энкодеры, Оптические датчики линейного положения, Дифракционные решётки.

### Введение

Оптические энкодеры используются в прецизионном машиностроении, требующем нанометрическое разрешение положения. Энкодер включает в себя две части: закреплённая шкала и подвижная измерительная головка.

В основе работы оптического энкодера могут лежать т. н. теневой или интерференционный методы. Теневой метод [1] подразумевает использование двух решёток: в шкале и измерительной головке — для создания картины Муара, в определённой точке которой интенсивность излучения зависит от смещения шкалы. В этой точке расположен приёмник излучения и цифровая обработка сигнала с этого приёмника позволяет определить смещение шкалы. Интерференционный метод [2] подразумевает использование двух дифракционных решёток для создания оптического сигнала путём интерференции пучков, сформированных от одного источника при дифракции на этих решётках в различных дифракционных порядках. На приёмнике излучения образуется интерференционная полоса бесконечной ширины, и, аналогично, цифровая обработка сигнала с приёмника позволяет определить смещение шкалы. Решётка в измерительной головке называется анализирующей шкалой, решётка измерительной шкалы называется собственно кодирующей шкалой.

Шкалы могут быть получены фотолитографическим, голографическим, нарезным, рольным и электронным литографическим методами. Фотолитографический метод [3] не позволяет получать шкалы с периодом менее 10 мкм и, таким образом, подходит только для теневого метода. Голографический метод не позволяет получить шкалы большого размера. Литографический метод требует наиболее современного и дорого оборудования для получения шкал без ошибок фазировки технологических фреймов, из которых состоят получаемые структуры. Нарезной метод не позволяет получить шкалы с высокой точностью периода штрихов. Рольный метод [4] ещё достаточно новый, очень дорогой и малодоступный.

### 1. Оптическая схема

Общепринятая оптическая схема интерференционного оптического энкодера показан на рисунке 1. Для повышения разрешения и снижения погрешности энкодера необходимо получать несколько разнофазных оптических сигналов. Для решения этой задачи в общепринятой схеме существует четыре оптических канала и четыре приёмника излучения. Расфазировка сигналов достигается тонкой юстировкой оптических элементов.

Возможность минимизации габаритов энкодера ограничена из-за наличия четырёх оптических каналов в схеме (два справа и два слева). На кодирующей

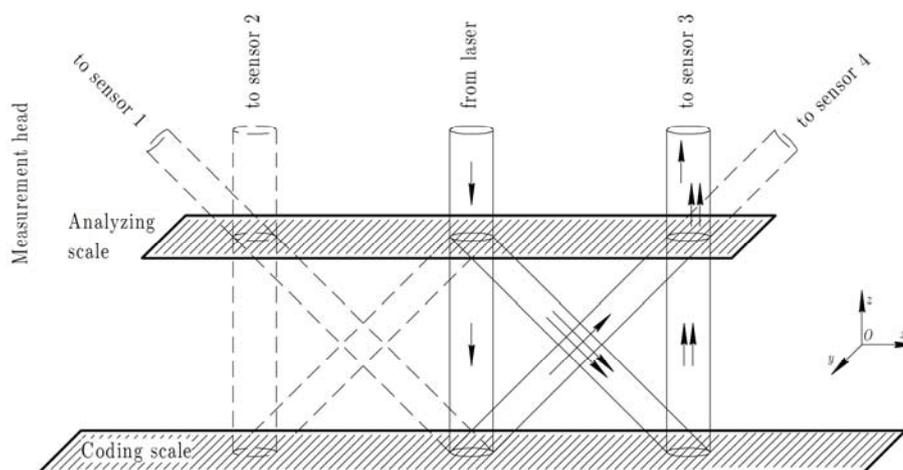


Рис. 1. Общепринятая оптическая схема

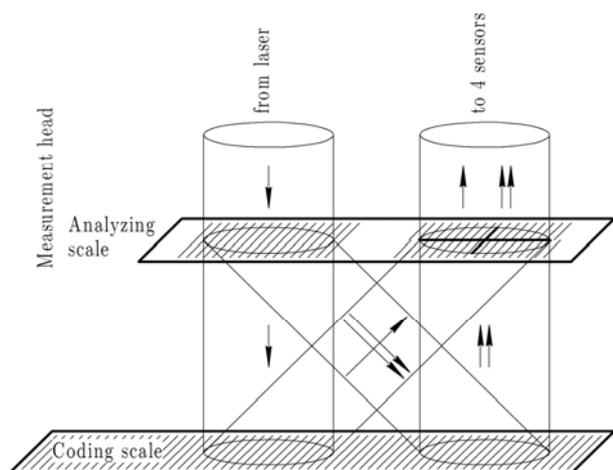


Рис. 2. Оптическая схема на основе 4-секционной анализирующей шкалы

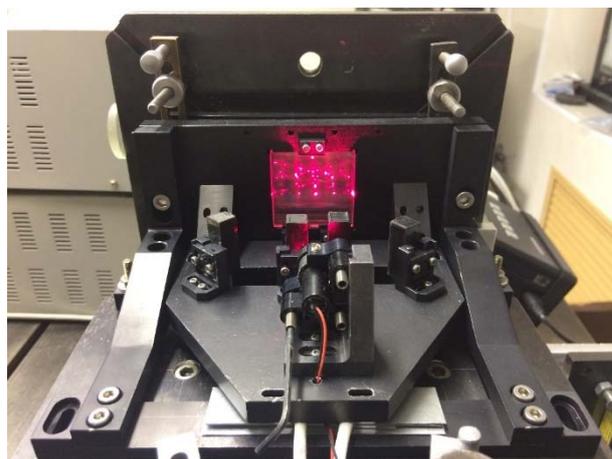


Рис. 3. Фотография экспериментального образца энкодера

Таблица 1. Зависимость расфазировки сигналов  $\Delta\Phi$  от угла наклона  $\gamma_{AS}$  анализирующей шкалы и расстояния  $l$  между шкалами

$\gamma_{AS}$	$\Delta\Phi_{1-1}$	$\Delta\Phi_{2-1}$	$\Delta\Phi_{3-1}$	$\Delta\Phi_{4-1}$
$l = 3 \text{ мм}$				
2"	0	$\pi/4$	0	$-\pi/4$
4"	0	$3\pi/2$	$\pi$	$\pi/2$
8"	0	$\pi$	0	$\pi$
$l = 10 \text{ мм}$				
6"	0	$\pi/4$	0	$-\pi/4$
12"	0	$3\pi/2$	$\pi$	$\pi/2$
24"	0	$\pi$	0	$\pi$

шкале должно быть три рабочих точки с некоторым расстоянием между ними.

Юстировка заключается в точном повороте и наклоне лазера и шкал. Поворачивая анализирующую шкалу на малый угол  $\gamma_{AS}$  вокруг оси  $Oy$  можно достигнуть расфазировку сигналов как показано в таблице 1. Расфазировка  $\Delta\Phi_{2-1}$  между сигналами приёмника 1 и приёмника 2 составляет

$$\Delta\Phi_{2-1} = \Phi_2 - \Phi_1,$$

где  $\Phi_1$  — фаза сигнала 1,  $\Phi_2$  — фаза сигнала 2.

Как видно из таблицы 1, необходим угол 4" между анализирующей и кодирующей шкалами при расстоянии 3 мм между ними, чтобы создать расфазировку четырёх сигналов с шагом  $\pi/2$ .

Мы предлагаем использовать один оптический канал для четырёх приёмников применяя 4-секционную анализирующую шкалу вместо четырёх оптических каналов и приёмников со сплошной шкалой. Предлагаемая анализирующая шкала состоит из четырёх секций с равной пространственной частотой около 1,000 л/м, но с различной начальной фазой, сдвинутой на  $\pi/2$  друг относительно друга. Современные электронно-лучевые литографы могут производить подобные сложные структуры. Оптическая схема с одним каналом требует только двух рабочих точек с вдвое мень-

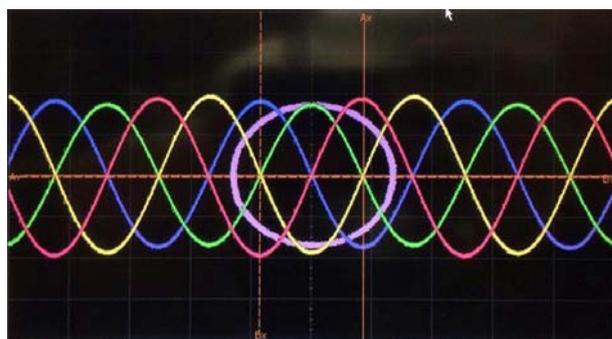


Рис. 4. Sin, Cos,  $-\text{Sin}$ , и  $-\text{Cos}$  сигналы, полученные на общепринятой оптической схеме, и фигура Лиссажу для первого и второго из них

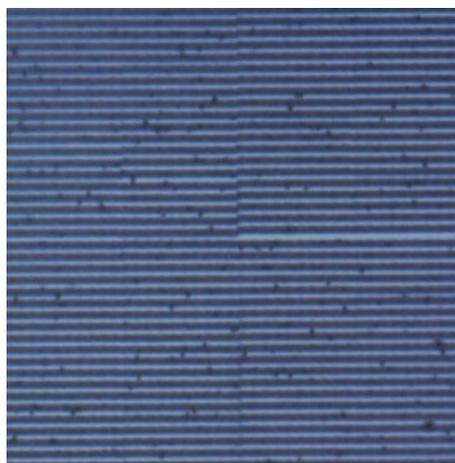


Рис. 5. Вид 4-секционной дифракционной решётки в оптический микроскоп

шим рабочим расстоянием на кодирующей шкале. Расфазировка сигналов достигается автоматически без тонкой юстировки.

## 2. Экспериментальные исследования

В процессе экспериментальных исследований мы создали экспериментальный образец энкодера на основе общепринятой оптической схемой, показанный на рисунке 6. Путём юстировки оптической системы и прежде всего положения анализирующей шкалы, мы получаем четыре расфазированных сигнала, показанных на рисунке 4. Фигура Лиссажу, построенная по

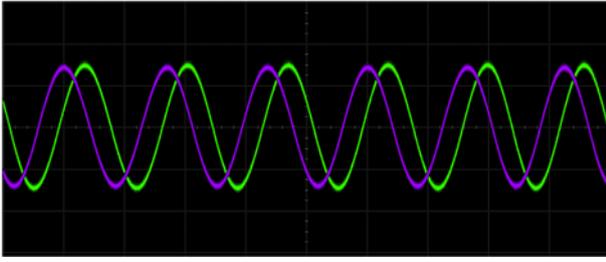


Рис. 6. Sin и Cos сигналы, полученные в 2-секционной схеме

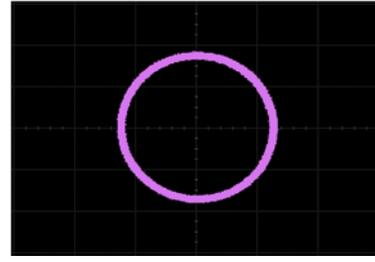


Рис. 7. Фигура Лиссажу для сигналов, полученных в 2-секционной схеме

первому и второму сигналам также показана на рисунке 4. Используя 4-секционную шкалу мы получили расфазированные сигналы, два из которых показаны на рисунке 6. Фигура Лиссажу, построенная по этим двум сигналам показана на рисунке 7.

Как видно из последних рисунков, сигналы, полученные с 4-секционной дифракционной решёткой и фигура Лиссажу, построенная по ним, имеют меньший шум. Измерения показывают, что шум снижается в 4–6 раз. Это вызвано тем, что оптическая схема с 4-секционной шкалой съюстирована вне зависимости от угла наклона  $\gamma$  между анализирующей и кодирующей шкалами и чувствительность шума к разъюстировке других оптических компонентов снижена.

Более того, схема с 4-секционной шкалой показывает меньшую зависимость разности фаз  $\Delta\Phi$  от положения оптических компонентов.

#### Список источников

- [1] **Rozman, J.** Linear Optical Encoder System with Sinusoidal Signal Distortion Below  $-60$  dB / J. Rozman, A. Pleteršek // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2010. — Vol. 59. — No. 6.
- [2] **Teimel, A.** Technology and Applications of Grating Interferometers in High-Precision Measurement // Precision Engineering. — 1992. — Vol. 14 — No. 4.
- [3] **Li, X.** Analysis of Signal Distortion Caused by Opening Ratio Variation of Main Scale And Index Scale in Linear Encoder / X. Li, L. Yin, Y. Shi, G. Ye, H. Yu, H. Liu // Advanced Materials Research. — 2013. — Vols. 712–715. — P. 1833–1837.
- [4] **Fan, S.** A Study on the Fabrication of Main Scale Of Linear Encoder Using Continuous Roller Imprint Method / S. Fan, Y. Shi, L. Yin, L. Feng, H. Liu // Proceedings of SPIE. — 2013. — Vol. 8916. — P. 3W.
- [5] **Жердев, А. Ю.** Модель дифракции излучения на дифракционной решётке в произвольной системе координат для анализа погрешностей расположения элементов оптических систем / А. Ю. Жердев, С. Б. Одинокоев, Д. С. Лушников, В. Е. Талалаев, М. В. Шишова // Голография. Наука и практика: 13-я международная конференция «ГолоЭкспо 2016»: Тезисы докладов. — 2016. — С. 291–294.

## Optical encoder based on four-section diffraction grating

*A. Y. Zherdev, M. V. Shishova, D. S. Lushnikov, S. B. Odionokov, V. V. Markin*  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Optical position encoder consists of movable coding grating and fixed analyzing grating. Light passing and diffracting through these two gratings creates interference signal on optical detector. Decoding of interference signal phase allows to determinate current position. Known optical position encoders use several accurate adjusted optical channels and detectors to gather several signals with different phase for higher encoder accuracy. We propose to use one optical channel with several-section analyzing diffraction grating for this purpose to simplify optical scheme and adjusting requirements. Optical scheme of position encoder based on four-section analyzing diffraction grating is developed and described in this paper.

**Keywords:** Optical encoder, Optical displacement sensor, Precision position sensor, Linear encoder, Diffraction grating.

## 2.11. Использование плазмонных дифракционных структур с магнитооптическими слоями в устройствах считывания скрытой магнитной информации на документах

С. Б. Одинок, А. С. Кузнецов, С. А. Барышев

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

Объектом исследования являются системы визуализации и регистрации носителей информации с магнитными элементами. Изучены эффекты резонансного усиления магнитооптического эффекта Фарадея в зависимости от геометрических параметров магнитоплазмонной структуры.

**Ключевые слова:** эффект Фарадея, Плазмоника, Магнитооптика, Гранат.

В последнее время возрастает интерес к поверхностным плазмон-поляритонным волнам, связанный с локализацией электромагнитного поля в малой приграничной области и возможностью его волноводного распространения [1].

Эффективным методом управления оптическими свойствами сред является использование намагниченных материалов [2]. Наряду с возможностью изменения оптических свойств среды под действием внешнего магнитного поля, это приводит к появлению целого ряда эффектов магнитооптики, обусловленных наличием намагниченности в среде.

В ферромагнитных металлах, таких как железо, никель и кобальт, наблюдается наибольшее значение удельного фарадеевского вращения [3]. В то же время ферромагнитные материалы непрозрачны в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах и обладают значительными оптическими потерями. Поэтому большую значимость имеют ферромагнитные диэлектрики, обладающие меньшей величиной магнитооптических эффектов, но в то же время существенно меньшим коэффициентом поглощения. Среди них можно выделить висмут содержащие пленки феррит-гранатов. Эти материалы могут иметь относительно сложный химический состав, включающий различные редкоземельные ионы [3].

Магнитооптические эффекты могут быть также усилены также за счет возбуждения собственных волн структуры, в частности, в металл-диэлектрических структурах при возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) [4].

Актуальной задачей является разработка новых методов и систем для считывания скрытой магнитной информации с ценных документов, носителей аудио-видео записей или защитных голограмм с целью их контроля подлинности [5–8]. Наиболее перспективными методами являются магнитооптические методы, и устройства их реализующие.

В работах [9–11] особое внимание уделено использованию периодических решеток на основе золота в слоях феррит-граната с целью резонансного усиления магнитооптического эффекта Фарадея в магнитных плазмонных структурах.

В данной работе были исследованы явление резонансного усиления магнитооптического эффекта Фарадея, и его зависимости от геометрических парамет-

ров и материалов используемой магнитной плазмонной структуры. В работе [4, 12] была представлена схема устройства считывания магнитной информации с ценных документов, с использованием магнитной плазмонной структуры, представленная на рисунке 1.

С помощью программы Comsol Multiphysics было проведено моделирование магнитоплазмонной структуры. Возникающие эффекты описывались с помощью метода конечных элементов с шагом сетки в 10 нм.

В ходе моделирования были исследованы зависимости угла Фарадея от высоты слоя периодической решетки  $h_r$ , от ее периода  $d$ , от угла падения излучения  $\theta$  и высоты магнитооптической пленки феррит-граната. Расчеты были проведены как для структур с одномерной периодической решеткой из благородного материала (золота), так и для однородных структур (без использования решетки). В ходе анализа полученных результатов моделирования, и путем перебора были подобраны следующие значения параметров структуры:  $h = 500$  нм,  $h_r = 100$  нм,  $d = 600$  нм,  $d_{отв} = 75$  нм и  $\theta = 8^\circ$  и  $31^\circ$ , при которых наблюдалось значительное возрастание магнитооптического отклика. На рисунках 2 и 3 представлены результаты моделирования структуры с указанными параметрами.

При использовании плазмонной решетки согласно рисунку 2, график  $\theta_F(\lambda)$  имеет резкие пики во вращении плоскости поляризации на длинах волн 0,577



1 — поляризатор, 2 — магнитная плазмонная структура, 3 — ценный документ с носителем магнитной информации, 4 — анализатор

Рис. 1. Схема устройства считывания магнитной информации с использованием магнитной плазмонной структуры

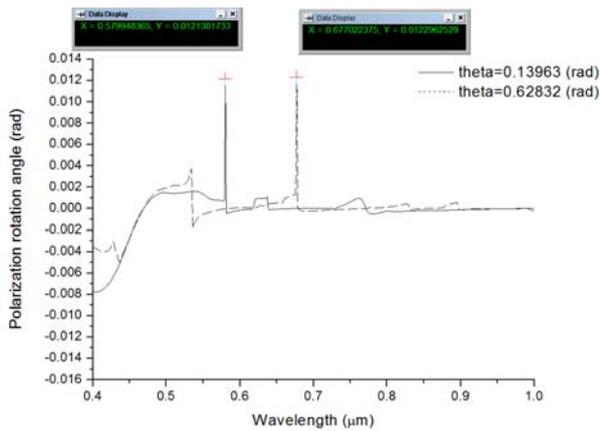


Рис. 2. График спектральной зависимости угла фарадея  $\theta(\lambda)$  для структур с плазмонной решеткой при разных углах падения излучения  $\theta$  во вращении плоскости поляризации и без решетки

и 0,677 мкм. Усиление магнитооптического эффекта в такой структуре объясняется возбуждением квазиволноводных мод на поверхности раздела металл-кристалл.

На рисунке 3 укрупненно показано влияние наличия плазмонной золотой решетки на магнитооптический отклик  $\theta(\lambda)$ , наблюдается усиление магнитооп-

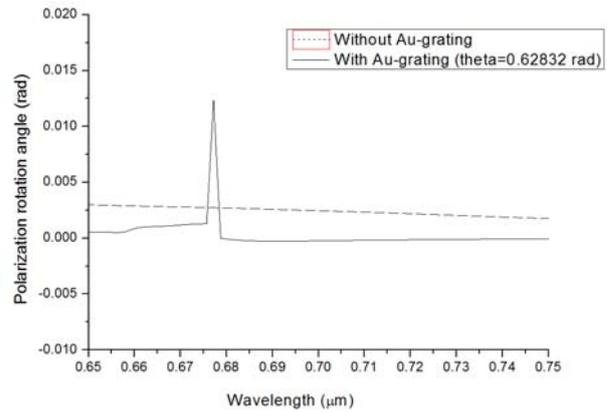


Рис. 3. График спектральной зависимости угла фарадея  $\theta(\lambda)$  для структур с плазмонной золотой решеткой и без неё

тического эффекта Фарадея более чем в 6 раз по сравнению с однородной структурой (без использования золотой решетки).

В ходе проведенных исследований определены оптимальные геометрические параметры магнитной плазмонной структуры, позволяющие наблюдать усиление магнитооптического эффекта Фарадея в несколько раз по сравнению со структурами без использования плазмонов. Данные результаты позволяют судить об улучшении оптических характеристик устройств считывания скрытой магнитной информации с документов.

#### Список источников

- [1] Калиш, А. Н. Магнитооптические эффекты в периодических наноструктурированных средах: дис. канд. физ.-мат. наук. — М., 2013. — 167 с.
- [2] Odínokov, S. B. Optoelectronic Device for Reading of Hidden Magnetic Information from the Holograms / S. B. Odínokov, A. S. Kuznetsov, A. P. Gubarev // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2008. — Vol. 17. — № 1. — P. 15–22.
- [3] Звездин, А. К. Магнитооптика тонких пленок / А. К. Звездин, В. А. Котов. — М.: Наука, 1988. — 192 с.
- [4] Одинок, С. Б. Использование магнитоплазмонных структур в устройствах считывания магнитной информации с ценных документов / С. Б. Одинок, А. С. Кузнецов, Л. А. Найден, А. Ю. Жердев // Лазеры в науке, технике, медицине. — 2016. — С. 126–129.
- [5] Одинок, С. Б. Оценка разрешающей способности двуслойных магнитных структур / С. Б. Одинок, А. С. Кузнецов // Наука и образование. — МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. — № 2. — С. 21.
- [6] Одинок, С. Б. Исследование возможности магнитооптической регистрации магнитных сигналов формата записи типа VHS / С. Б. Одинок, А. С. Кузнецов, А. В. Карев // Естественные и технические науки. — 2014. — № 4. — С. 122–124.
- [7] Кузнецов, А. С. Оптико-электронный датчик магнитных полей сигналов ленточных носителей видеозаписи / А. С. Кузнецов, С. Б. Одинок // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. — 2014. — № 2–1. — С. 60–63.
- [8] Губарев, А. П. Магнитооптическая визуализация двуслойных магнитных структур / А. П. Губарев, А. С. Кузнецов, С. Б. Одинок // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана: Серия: Приборостроение. — 2005. — № 3. — С. 25–40.
- [9] Baryshev, A. V. Peculiarities of plasmon-modified magneto-optical response of gold-garnet structures / A. V. Baryshev, H. Uchida, M. Inoue // J. Opt. Soc. Am. B. — 2013. — Vol. 30. — № 9. — P. 2371–2376.
- [10] Belotelov, V. I. Extraordinary magneto-optical effects and transmission through metal-dielectric plasmonic systems / V. I. Belotelov, L. L. Doskolovich, A. K. Zvezdin // Phys. Rev. Lett. — 2007. — Vol. 98. — # 7. — P. 077401.
- [11] Досколович, Л. Л. Резонансные магнитооптические эффекты в дифракционных решетках с намагниченным слоем / Л. Л. Досколович, Е. А. Безус, Д. А. Быков, В. А. Белотелов, А. К. Звездин // Компьютерная оптика. — 2007. — Том 31. — № 1. — С. 4–8.
- [12] Zherdev, A. Y. Detection of thin ferromagnetic layers based on Faraday effect / A. Y. Zherdev, S. A. Baryshev, S. B. Odínokov, A. S. Kuznetsov // III международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии»: Сборник трудов. — 2017. — С. 325–327.

## **Application of plasmonic diffraction structures with magneto-optic layers for devices reading magnetic information hidden in documents**

*S. B. Odinokov, A. S. Kuznetsov, S. A. Baryshev*

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Visualization and registration of information carriers containing magnetic elements systems were looked into. Studies of resonance amplification of the magneto-optical Faraday effect depending on geometrical parameters magnetoplasmonic structure were carried out.

**Keywords:** Faraday rotation, Plasmonics, Magneto-optics, Garnet.



### 3. Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики



### 3.1. Однослойные дифракционные элементы для фото- и видеокамер мобильных устройств

Г. И. Грейсук, Е. Г. Ежов, С. В. Казин, С. А. Степанов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Скорректированы условия, гарантирующие отсутствие визуально наблюдаемого гало в изображении, формируемом камерой мобильного электронного устройства, объектив которого включает дифракционную линзу с однослойной пилообразной рельефно-фазовой микроструктурой. На примере пластмассово-линзового объектива, предназначенного для смартфона, продемонстрированы целесообразность и эффективность включения в его схему такой дифракционной линзы.

**Ключевые слова:** Дифракционная эффективность, Рельефно-фазовая дифракционная микроструктура, Гало, Дифракционная линза, Рефракционно-дифракционный объектив.

Основной целью включения в схему изображающей оптической системы, рассчитанной на полихроматическое излучение, элемента с пилообразной рельефно-фазовой дифракционной микроструктурой (РФДМ) является коррекция аберраций и, прежде всего, хроматизма (см., например, [1, 2]). В частности, дифракционный элемент, представляющий собой дифракционную линзу (ДЛ) с небольшой оптической силой, позволяет достичь высокой степени коррекции хроматизма, необходимой для получения высококачественного цветного изображения, даже используя ограниченный набор оптических материалов, например, коммерчески доступные оптические пластмассы [3, 4].

Ввиду малой оптической силы микроструктура ДЛ содержит, как правило, не более 20–30 кольцевых зон Френеля (здесь отметим, что применительно к РФДМ под термином «зона Френеля» понимается участок структуры, в пределах которой фазовая задержка, вносимая структурой в падающий на неё волновой фронт, изменяется от 0 до  $2\pi$  [5]). В этом случае минимальная ширина самой узкой зоны, отнесенная к глубине пилообразного микрорельефа,  $\lambda_{\min}/h > 10$ . В результате, как показано, например, в [6], реальная ДЭ, которая может быть оценена путем численного решения уравнений Максвелла, практически совпадает с оценкой, получаемой в рамках скалярной теории дифракции и в приближении бесконечно тонкого транспаранта. Поэтому ниже для анализа зависимости ДЭ от длины волны  $\lambda$  и угла падения излучения на РФДМ из воздуха  $\theta$  будем использовать выражение, полученное в скалярном приближении и приведенное, например, в [7]:

$$\eta_m = \left\{ \frac{\sin[\pi(\Delta l / -m)]}{\pi(\Delta l / -m)} \right\}^2, \quad (1)$$

где

$$\Delta l = h \left( \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right) \quad (2)$$

приращение оптического пути на одном периоде пилообразной РФДМ,  $m$  — номер дифракционного порядка,  $n$  — показатель преломления на длине волны  $\lambda$  материала, в котором выполнена РФДМ.

Из выражений (1) и (2) нетрудно видеть, что при выбранном оптическом материале и оптимальной глубине рельефа максимальное и минимальное значения ДЭ определяются шириной спектрального диапазона  $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$  и полуинтервалом углов падения излучения на РФДМ  $0 \leq \theta \leq \theta_{\max}$ . Здесь заметим, что под оптимальной глубиной рельефа  $h_{\text{opt}}$  понимается глубина, обеспечивающая, в частности,  $\eta = 1$  в первом рабочем порядке дифракции ( $m = 1$ ) на одной из длин волн заданного спектрального диапазона.

Полевые углы  $2\omega$ , на которые рассчитываются компактные и высокоразрешающие объективы фото- и видеокамер мобильных электронных устройств обычно не превышают  $80^\circ$ . При этом максимальные углы падения излучения на РФДМ удается, как правило, ограничить  $25^\circ$ . Поэтому ниже при анализе характеристик ДЭ однослойных РФДМ, выполненных из технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс, за максимальное значение угла падения излучения на микроструктуру принято  $\theta_{\max} = 25^\circ$ . Кроме того фиксировалась длинноволновая граница заданного спектрального диапазона. За нее принималась длина волны красной С-линии водорода  $\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,6563$  мкм.

При выше оговоренных условиях, используя выражения (1) и (2), для типичных кроно- и флинтоподобных технологичных и коммерчески доступных сегодня оптических пластмасс определялись оптимальная глубина рельефа  $h_{\text{opt}}$  и коротковолновая граница спектрального диапазона  $\lambda_{\min}$ , обеспечивающие ДЭ  $\eta \geq 0,85$  при всех значениях длины волны и угла падения излучения:  $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$  и  $0 \leq \theta \leq \theta_{\max}$ . Полученные зависимости  $\eta$  от  $\lambda$  для всех значений  $\theta$  представляют собой гладкие выпуклые кривые, достигающие максимума  $\eta = 1$  на длине волны  $\lambda_m$ . Принципиально значимые параметры этих кривых сведены в таблицу.

Таблица показывает, что от оптического материала с дисперсионными характеристиками, подобными легкому крону [polymethylmethacrylate (PMMA)], кроно [Zeonex cyclo-olefin polymer (E48R)] или флинту [polycarbonate (PC)], прежде всего, зависят ширина спектрального диапазона и оптимальная глубина рельефа. При этом все материалы на краях выбранного ин-

Таблица 1. Достижимые характеристики ДЭ однослойной микроструктуры, выполненной из технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс

Марка пластмассы	$\lambda_{\min}$ , мкм	$\theta$ , °	$\lambda_{\max}$ , мкм	$h_{\text{opt}}$ , мкм	$\eta$ на длине волны	
					$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
PMMA	0,4575	0	0,5184	1,047	0,933	0,851
		19	0,5368		0,890	0,886
		25	0,5507		0,851	0,910
E48R	0,4570	0	0,5187	0,969	0,931	0,851
		19	0,5365		0,889	0,885
		25	0,5499		0,851	0,909
PC	0,4640	0	0,5237	0,883	0,929	0,851
		19	0,5400		0,887	0,884
		25	0,5524		0,851	0,907

тервала углов падения излучения ( $0 \leq \theta \leq 25^\circ$ ) обеспечивают оговоренные во введении условия гарантированного отсутствия гало в изображении, регистрируемом матричным фотоприемником. В то же время внутри интервала имеются углы, при которых  $0,85 < \eta < 0,9$  одновременно на обоих краях выбранного спектрального диапазона, причем  $[\eta(\lambda_{\min}) + \eta(\lambda_{\max})]/2 \geq 0,88$ .

Чтобы оценить степень гарантированности отсутствия гало на этих углах, обратимся к типичным кривым спектральной чувствительности матричного RGB фотоприемника (рисунок 1) и предположим, что благодаря полосовому светофильтру на фотоприемник попадает излучение только с длинами волн, удовлетворяющими условию  $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ .

Учитывая приблизительную симметрию кривой суммарной чувствительности CMOS-фотоприёмника к видимому излучению относительно вертикали, соответствующей длине волны  $\lambda \approx 0,525$  мкм (в частности, чувствительность матрицы на длинах волн 0,4570 мкм и 0,6563 мкм отличается незначительно), а также то, что коротковолновая и длинноволновая части спектра регистрируются фактически двумя независимыми каналами фотоприёмника, можно с уверенностью полагать, что реакция матрицы на пропускаемое излучение с коротковолновой и длинноволновой сторон рабочего спектра будет подобной.

И если при этом благодаря ДЭ, заключенной в интервале  $0,85 \leq \eta \leq 1$ , визуально наблюдаемое гало гарантировано отсутствует в пределах спектрального диапазона  $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$  [9], то оно столь же гарантировано будет отсутствовать и в спектральном диапазоне  $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ . Поэтому в скорректированном виде условия гарантированного отсутствия визуально наблюдаемого гало в изображении, формируемом оптической системой с однослойной пилообразной РФДМ и сопряженной с RGB светочувствительной матрицей должны иметь следующий вид. Кривые зависимости ДЭ РФДМ от длины волны во всем полуинтервале углов падения излучения на микроструктуру ( $0 \leq \theta \leq \theta_{\max}$ ) должны быть гладкими и выпуклыми, а

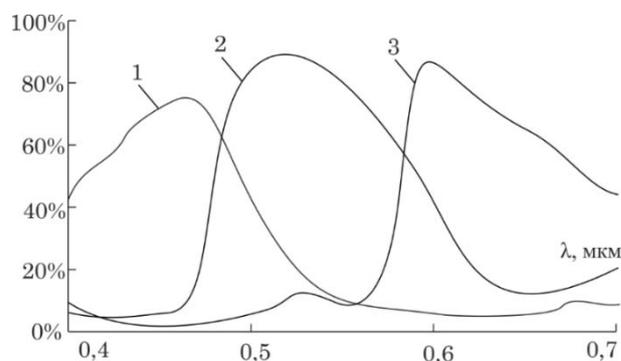


Рис. 1. Типичные кривые спектральной чувствительности элементов CMOS-фотоприемника, реагирующих на синий (1), зеленый (2) и красный (3) свет [8]

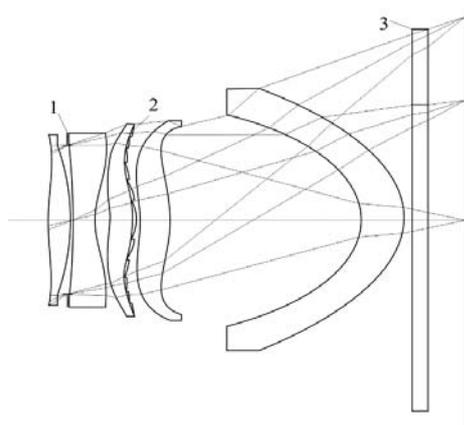
их характерные параметры в пределах всего используемого спектрального диапазона ( $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ ) удовлетворяют условию:  $\eta \approx 1$  на одной из длин волн внутри спектрального диапазона и  $\eta \geq 0,85$  на его краях. Сразу же подчеркнем, что отказ от более жесткого требования, допускающего падение ДЭ до уровня  $\eta \geq 0,85$  только в одной из точек внутри рабочих углового и спектрального диапазонов, позволяет значительно расширить эти диапазоны.

В качестве примера объектива, у которого достигнуто высокое качество формируемого изображения и одновременно соблюдены условия, обеспечивающие отсутствие гало, можно привести компактный пластмассово-линзовый рефракционно-дифракционный объектив, предназначенный для фото- и видеокамеры смартфона [10]. Включение в этот объектив РФДМ, нанесенной на поверхность одной из пластмассовых рефракционных линз (РЛ), призвано обеспечить достижение требуемой коррекции хроматизма при минимальном количестве марок используемых для этих линз оптических пластмасс.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема рассчитанного объектива. Все РЛ этого объектива выполнены только из одного наиболее технологичного и коммерчески доступного кроноподобного пластика E48R. Компоновка схемы объектива и его расчет осуществлялись с использованием методики, изложенной в работах [2, 11] и дополненной работой [12]. Оптимизация конструктивных параметров осуществлялась с помощью программы оптического проектирования ZEMAX [13].

Фокусное расстояние рассчитанного объектива  $f = 4,63$  мм, диафрагменное число  $F\# = 2,2$ , а углового поле в пространстве предметов  $2\omega = 64^\circ$ .

Формат матричного фотоприемника  $1/3''$  (диагональ  $2y' = 6$  мм), суммарная длина объектива (расстояние от вершины фронтальной поверхности первой линзы до плоскости изображения, формируемого объективом)  $L = 5,5$  мм, дисторсия меньше 1 %. О способности объектива формировать полихроматическое изображение в спектральном диапазоне от 0,457 мкм до 0,6563 мкм с высоким разрешением по требуемому



1 — апертурная диафрагма; 2 — поверхность РЛ, на которой сформирована РФДМ; 3 — полосовой фильтр, отсекающий коротковолновое и ИК-излучение

Рис. 2. Принципиальная схема рефракционно-дифракционного объектива смартфона

полю свидетельствует частотно-контрастная характеристика, показывающая, что контраст по всему полю не опускается ниже 0,5 для пространственных частот до 100 л/мм и ниже 0,2 для частот до 200 л/мм.

Благодаря расположению РФДМ на задней поверхности третьей РЛ удалось обеспечить сравнительно низкие ( $\theta < 25^\circ$ ) углы падения лучей из воздуха

на микроструктуру, что является одним из условий достижения высокой ДЭ и отсутствия гало. Вторым из условий отсутствия гало является ограничение спектрального диапазона излучения, падающего на фотоприемник. Это осуществляется с помощью полосового фильтра, обрезающего излучение с длинами волн  $\lambda < 0,457$  мкм, а также ИК-излучение. В результате все условия, обеспечивающие высокое качество изображения и отсутствие гало, оказались выполненными.

В заключение отметим, что использование полосового фильтра окажет на формируемое на матричном фотоприемнике изображение примерно то же влияние, что и обычно применяемый при фотосъемке желтый светофильтр ЖС-12 [14]. Возникающий в этом случае желтоватый оттенок изображения, при желании, может быть устранен цифровой коррекцией с помощью инструмента «Баланс белого» в любом растровом редакторе, например, Adobe Photoshop [15]. Кроме того, в программном обеспечении камеры мобильного устройства возможно предусмотреть автоматический сдвиг баланса белого на заранее заданную величину. Очевидно, что цифровая коррекция цвета может рассматриваться как плата за простейшую технологию штамповки РФДМ.

#### Список источников

- [1] Flores, A. Achromatic hybrid refractive–diffractive lens with extended depth of focus / A. Flores, M. R. Wang, J. J. Yang // *Applied Optics*. — 2004. — Vol. 43. — № 30. — P. 5618–5630.
- [2] Greisukh, G. I. Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems / G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, S. A. Stepanov // *Applied Optics*. — 2006. — Vol. 45. — № 24. — P. 6137–6141.
- [3] Greisukh, G. I. Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives / G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, I. A. Levin, S. A. Stepanov // *Applied Optics*. — 2010. — Vol. 49. — № 23. — P. 4379–4384.
- [4] Greisukh, G. I. Design of plastic diffractive–refractive compact zoom lenses for visible–near-IR spectrum / G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, Z. A. Sidyakina, S. A. Stepanov // *Applied Optics*. — 2013. — Vol. 52. — № 23. — P. 5843–5850.
- [5] Головашкин, Д. Л. Дифракционная компьютерная оптика / Д. Л. Головашкин, Л. Л. Досколович, Н. Л. Казанский, В. В. Котляр, В. С. Павельев, Р. В. Скиданов, В. А. Сойфер, С. Н. Хонина; под ред. В. А. Сойфера. — М.: Физматлит, 2007. — С. 736.
- [6] Greisukh, G. I. Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth / G. I. Greisukh, V. A. Danilov, E. G. Ezhov, S. A. Stepanov, B. A. Usievich // *Optics Communication*. — 2015. — Vol. 338. — P. 54–57.
- [7] Buralli, D. A. Optical performance of holographic kinoforms / D. A. Buralli, G. M. Morris, J. R. Rogers // *Applied Optics*. — 1989. — Vol. 28. — № 5. — P. 976–983.
- [8] Sony IMX234-0APH5-C / URL: <http://www.datasheets360.com/pdf/7800169355262593265>.
- [9] Грейсух, Г. И. Влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной цифровой фотокамерой / Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, С. В. Казин, С. А. Степанов // *Оптический журнал*. — 2016. — Том 83. — № 3. — С. 27–31.
- [10] Грейсух, Г. И. Однослойные киноформные элементы для фото- и видеокамер мобильных устройств / Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, С. В. Казин, С. А. Степанов // *Компьютерная оптика*. — 2017. — Том 41. — № 2. — С. 218–226.
- [11] Dutta, U. Monochromatic primary aberrations of a diffractive lens on a finite substrate / U. Dutta, L. Hazra // *Applied Optics*. — 2010. — Vol. 49. — № 18. — P. 3613–3621.
- [12] Грейсух, Г. И. Учёт дифракционной эффективности в методике проектирования рефракционно-дифракционных оптических систем / Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов // *Оптический журнал*. — 2016. — Том 83. — № 3. — С. 32–38.
- [13] ZEMAX: software for optical system design / URL: <http://www.radiantzemax.com>.
- [14] Спектральные характеристики пропускания светофильтров из цветного стекла / URL: [http://www.elektrosteklo.ru/Color\\_Glass\\_Spectral\\_Transmittance.pdf](http://www.elektrosteklo.ru/Color_Glass_Spectral_Transmittance.pdf).
- [15] Маргулис, Д. Photoshop LAB Color. Загадка каньона и другие приключения в самом мощном цветовом пространстве / Д. Маргулис; пер. с англ. — М.: Интелбук, 2006. — С. 480.

## Single-layer diffractive elements for cameras and video cameras of mobile communication devices

*G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, S. V. Kazin, S. A. Stepanov*

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

In the report, conditions that guarantee the absence of a visually observed halo in the image formed by the camera of a mobile communication device containing a diffractive lens with a single-layer saw tooth phase microrelief are corrected. The feasibility and effectiveness of using the diffractive lens with a single-layer microstructure, which does not lead to the emergence of a visually observable halo, are demonstrated by the example of a plastic objective lens for the smartphone. It is noted that the payment for a simple technology of forming of the diffractive lens's microstructure may be the need of the digital color correction.

**Keywords:** Diffraction efficiency, Relief-phase diffraction microstructure, Halo, Diffractive lens, Refractive-diffractive objective.

### 3.2. Дифракционные решетки на композите из бихромированного желатина и органического полимера

Н. М. Ганжерли<sup>1</sup>, И. А. Маурер<sup>2</sup>, С. Н. Гуляев<sup>2</sup>, С. Ю. Быховский<sup>2</sup>, Д. Р. Хазвалиева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты переноса голографической структуры дифракционных решеток со слоя бихромированного желатина (БХЖ) на материал подложки из полиметилметакрилата (ПММА). Продемонстрирован результат существенного увеличения высоты поверхностного рельефа до 1 и более мкм после применения специального проявителя на основе метилизобутилкетона (МИБК).

**Ключевые слова:** Голография, Дифракционные оптические элементы, Органические полимеры, Полиметилметакрилат, Резисты, Фоторезисты.

#### Введение

Желатин, как органический материал, хорошо поглощает УФ излучение. Для преобразования амплитудной голографической записи на галогидосеребряных фотослоях в рельефно-фазовую был разработан метод, использующий деструктивное воздействие коротковолнового УФ излучения с длиной волны менее 270 нм [1]. Метод зарекомендовал себя для изготовления различных голограммных оптических элементов, таких как микролинзовые растры [2], растры цилиндрических линз, дифракционные решетки, узконаправленные голографические диффузоры с эффективностью пропускания света порядка 100 % при отсутствии не рассеянной компоненты в прошедшем через диффузор свете [2–4] и т. д.

Кроме галогидосеребряных фотоэмульсий желатин является также основным компонентом слоев бихромированного желатина (БХЖ). В отличие от галогидосеребряных фотоэмульсий в слоях БХЖ осуществляется непосредственное изменение физико-химических свойств желатина при голографической записи интерференционной картины за счет избирательного светового дублирования регистрирующим лазерным излучением в присутствии бихроматов. При этом происходит структурирование, т. е. установление большого количества поперечных связей в максимумах интерференционной картины. Задубленные лазерным излучением участки БХЖ менее подвержены разрушающему воздействию коротковолнового УФ излучения, поскольку большое количество поперечных связей препятствует фрагментации макромолекул в облученных участках желатина и растворению его в воде, что отмечено в [5].

В работах [6–8] исследовались характеристики поверхностного рельефа голографических дифракционных решеток с пространственной частотой  $10^3 \text{ мм}^{-1}$ , которые регистрировались по симметричной оптической схеме на слоях БХЖ излучением He–Cd лазера с длиной волны 0,44 мкм. Слои БХЖ изготавливались в лабораторных условиях подобно способу, описанному в работе [9]. Такой подход позволил варьировать толщину получаемых слоев и концентрацию бихромата аммония. На стеклянную подложку поливался горячий

раствор 6-ти процентного желатина, в который предварительно добавлялся бихромат аммония в количестве 0,4 г на 100 мл раствора. После высыхания толщина слоев составляла от единиц до десятков мкм. Экспонированные решетки обрабатывались купанием в 2-х процентном растворе сульфита натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  в течение 5 мин., далее промывались 20 мин. в проточной воде и сушились при комнатной температуре. Обработка слоев ультрафиолетовым излучением проводилась согласно описанной в работе [1] методике и заключалась в облучении образцов с помощью ртутно-кварцевой лампы ДРТ-220 на расстоянии 5–10 см в течение 30–40 мин., промывке в воде в течение 4 мин. и сушке при комнатной температуре. Высота поверхностного рельефа в образцах решеток измерялась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 до и после воздействия УФ излучения.

Было показано, что облучение УФ излучением слоев БХЖ с записанными на них голографическими решетками приводит к десятикратному увеличению высоты поверхностного рельефа как для толстых ( $T_{\text{авт}} > 50 \text{ мкм}$ ), так и для тонких ( $T_{\text{авт}} < 3 \text{ мкм}$ ) слоев. Также получены сверхтонкие слои со средней толщиной  $T_{\text{авт}} < 0,7 \text{ мкм}$ , на которых впервые реализованы голографические решетки с дифракционной эффективностью, приближающейся к теоретическому пределу для тонких фазовых голограмм. Установлено, что при переходе от толстых к сверхтонким слоям энергетическая чувствительность БХЖ практически не изменяется.

#### 1. Слои БХЖ и фоторезисты

Ранее проведенные исследования показали, что при работе на слоях БХЖ толщиной в несколько микрометров многократное повторение процедуры *облучение слоя УФ излучением — удаление фотодegradированной желатины с помощью купания в воде* вызывает постепенное уменьшение средней величины слоя БХЖ до величины равной или менее 1 мкм. Вместе с тем высота поверхностного рельефа остается достаточно большой, т. е. порядка той же величины 1 мкм. При этом в наименее задубленных местах желатина полностью удаляется со стеклянной подложки, образуя окна в слое БХЖ (рисунки 1 и 2).

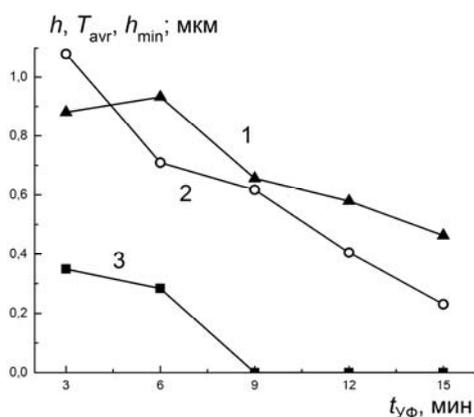


Рис. 1. Зависимость высоты поверхностного рельефа  $h$  (кривая 1), средней толщины слоя  $T_{avr}$  (кривая 2) и величины  $h_{min}$  (кривая 3) от времени повторного облучения голографических решеток УФ излучением  $t_{УФ}$

Из рисунка 1 видно, что величина  $h_{min}$  для сверхтонких структур может быть сделана близкой к нулю. Рисунок 2 отражает эволюцию профиля поверхностного рельефа при облучении УФ светом. Таким образом, если вместо стекла в качестве подложки выбрать иной оптический материал, имеющий достаточную чувствительность к коротковолновому УФ излучению, возможно осуществить перенос голографической структуры со слоя БХЖ непосредственно на материал подложки. В качестве материала подложки подходит любой органический полимер, на который коротковолновое УФ излучение оказывает деструктивное воздействие.

Наиболее используемыми в оптических применениях органическими полимерами являются полиметилметакрилат (ПММА) и поликарбонат. Известно применение этих материалов в литографии и фотолитографии для создания высококачественных пространственно-периодических структур в основном для целей микроэлектроники. ПММА и поликарбонат также известны, как электронные и ионные позитивные резисты, где разрушение молекул полимера происходит под воздействием электронных или ионных пучков. Менее известно применение ПММА в качестве позитивного фоторезиста для коротковолнового УФ излучения ( $\lambda \leq 248-254$  нм) [10, 11], т. е. в области спектра излучения ртутных ламп.

В отличие от слоев БХЖ, в которых фотодеградированные участки желатины вымываются простой водой, для вымывания разрушенных УФ излучением или электронным пучком участков органических позитивных фоторезистов требуются специальные травящие составы — проявители. Для резистов на основе ПММА наиболее сильным проявителем является чистый метилизобутилкетон (МИБК). Также используются смеси МИБК + изопропанол (1:3), чистый изопропанол, смесь изопропанола с водой (1:1), ацетон и др. Для проявления резистов на основе поликарбоната используются тот же МИБК, а также циклопентанон,

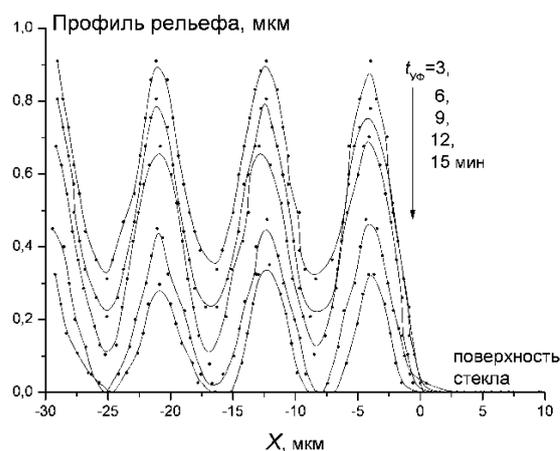


Рис. 2. Эволюция профиля поверхностного рельефа решетки в зависимости от времени облучения УФ излучением  $t_{УФ}$

ксилол, пентилацетат, ацетат монометилового эфира пропиленгликоля и их смеси с изопропанолом (обычно в соотношении 1:3) [12–16].

Исходя из вышеизложенного, перенос голографической структуры на поверхность подложки из органического материала можно осуществить, последовательно применяя технологию обработки слоев БХЖ и технологию обработки фоторезистов. Эксперименты в этой области и являются основной задачей настоящей работы, поскольку могут иметь широкое применение в виде непосредственного формирования пространственно-периодических структур на поверхности оптических элементов. Для проведения подобного эксперимента в качестве подложки нами был выбран ПММА.

## 2. Перенос голографической структуры на подложку из ПММА

Наибольшие величины поверхностного рельефа на ПММА были получены на образце с начальной толщиной слоя БХЖ порядка 5 мкм. Образец после экспонирования слоя БХЖ He–Cd лазером обрабатывался в 2-х процентном растворе сульфита натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  в течение 5 мин., купался в воде и сушился при комнатной температуре. Измеренная высота поверхностного рельефа на БХЖ до УФ облучения составила около 0,2 мкм (рисунок 3, кривая, отмеченная квадратами). Далее решетки трижды обрабатывался по схеме *УФ облучение в течение 24 мин. — промывка в воде комнатной температуры 4 мин. для травления желатина — сушка*. Каждый раз измерялась высота поверхностного рельефа как перепад между гребнем и впадиной решетки. Максимальная высота поверхностного рельефа на слое БХЖ составила порядка 0,6 мкм (рисунок 3, кривая, отмеченная полыми кружками)

После третьего цикла облучения в течение 40 мин. остатки БХЖ механически удалялись купанием в горячей воде с температурой 45 °С. Далее измерялась высота поверхностного рельефа, образовавшегося на подложке из ПММА. Она составила порядка 0,2 мкм (рисунок 4, кривая, помеченная квадратами). После

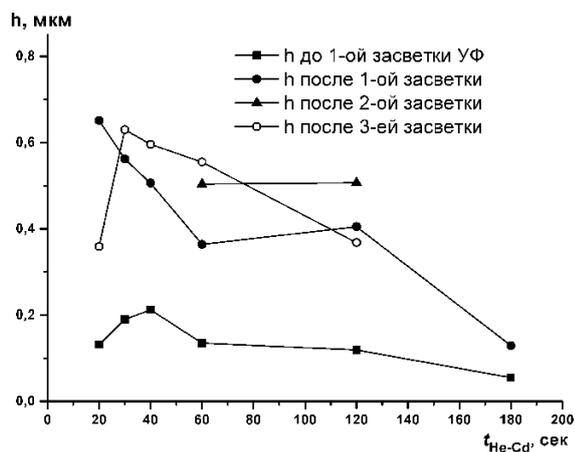


Рис. 3. Высота поверхностного рельефа на слое БХЖ до и после циклов засветки УФ излучением

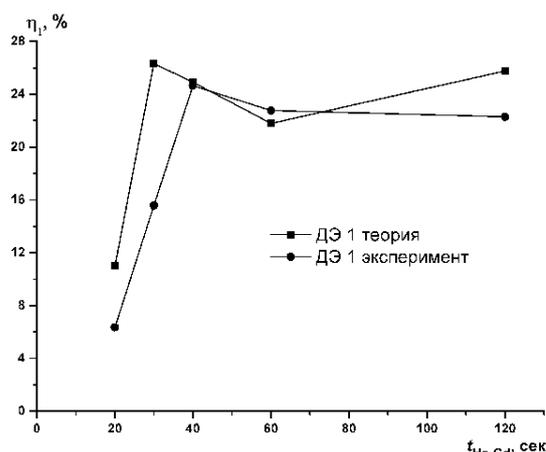


Рис. 5. Зависимость дифракционной эффективности решеток на ПММА от времени экспонирования слоев БХЖ He–Cd лазером

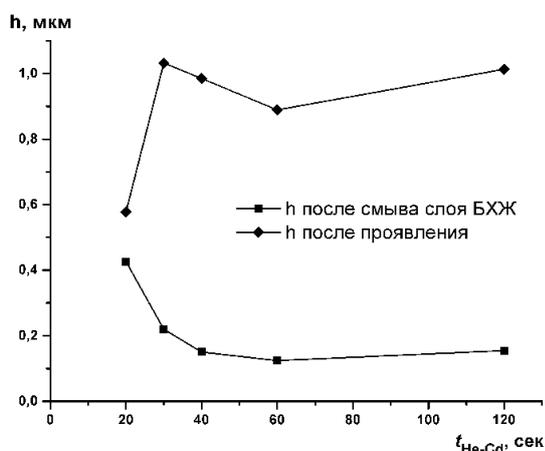


Рис. 4. Высота поверхностного рельефа на ПММА до и после проявления МИБК + изопропанол

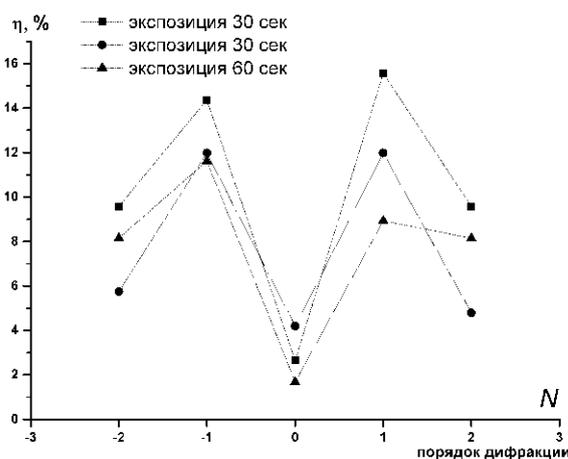


Рис. 6. Дифракционная эффективность решеток на ПММА в разных порядках дифракции от времени экспонирования слоев БХЖ He–Cd лазером

проявления образца на ПММА в специальном проявителе, состоящем из метилизобутилкетона (МИБК) с добавлением изопропилового спирта в соотношении 3:4, высота рельефа увеличилась до 1 мкм и более для решеток с разным временем экспонирования He–Cd лазером (рисунок 4).

Анализ влияния различных проявителей для резистов типа ПММА показал, что в отличие от проявления в чистом изопропанол, в водном растворе изопропанола или в ацетоне, лучший результат был получен при обработке в смеси МИБК и изопропанола в соотношении 3:4.

Решетки на подложке из ПММА при освещении He–Ne лазером с длиной волны 0,63 мкм демонстрируют довольно высокую дифракционную эффективность, достигающую 26 %, что приблизительно соответствует дифракционной эффективности, полученной

из теории тонких рельефно-фазовых голограмм (рисунок 5).

Высокие значения глубины поверхностного рельефа приводят к нелинейности, что проявляется в появлении в дифракционных спектрах решеток высших порядков дифракции (рисунок 6).

### Заключение

Эксперименты подтвердили возможность успешного переноса рельефной структуры со слоя БХЖ на органический полимер ПММА. Использование специального проявителя, содержащего МИБК и изопропанол, позволяет получить на полиметилметакрилате дифракционные решетки с пространственной частотой  $100 \text{ мм}^{-1}$  и высотой рельефа порядка 1 мкм, что достаточно для получения дифракционных структур высокой эффективности в видимой области спектра.

### Список источников

- [1] Гуляев, С. Н., Свойства рельефно-фазовых голограмм, полученных при обработке фотопластинок коротковолновым ультрафиолетовым излучением и двухступенчатом отбеливании / С. Н. Гуляев, В. П. Ратушный // Оптический журнал. — 2003. — Том 70. — № 2. — С. 45–49.

- [2] **Ганжерли, Н. М.** Формирование случайных и регулярных рельефно-фазовых структур на галоидосеребряных фотоэмульсиях голографическими методами / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, А. С. Гурин, Д. Д. Крамущенко, И. А. Маурер, Д. Ф. Черных // ЖТФ. — 2009. — Том 79. — № 7. — С. 76–80.
- [3] **Ганжерли, Н. М.** Создание оптических рассеивателей на галоидосеребряных фотоматериалах с помощью мультиплексных голограмм / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер, Д. Ф. Черных // ЖТФ. — 2014. — Том 84. — № 12. — С. 112–116.
- [4] **Ганжерли, Н. М.** Формирование поверхностного рельефа сложных голографических структур на фотоматериале / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер, Д. Ф. Черных // Оптический журнал. — 2015. — Том 82. — № 3. — С. 37–42.
- [5] **Гуляев, С. Н.** Рельефно-фазовые голограммы на фотоэмульсионных слоях, облученных ультрафиолетовым излучением: автореф. дис. ... канд. наук: 01.04.04, 01.04.05 / С. Н. Гуляев. — Санкт-Петербург: СПбГПУ. — 2006. — С. 19.
- [6] **Ганжерли, Н. М.** Влияние УФ-излучения на свойства дифракционных решеток на бихромированном желатине / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер // Письма в ЖТФ. — 2016. — Том 42. — № 19. — С. 26–30.
- [7] **Ганжерли, Н. М.** Изменение свойств голографических дифракционных решеток на бихромированном желатине после воздействия коротковолнового УФ излучения / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер // Голография. Наука и практика. 13-я Международная Конференция ГолоЭкспо 2016. Тезисы докладов. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — С. 131–136.
- [8] **Ганжерли, Н. М.** Создание голографических структур на композите из бихромированного желатина и органического полимера / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. — Москва: НИЯУ МИФИ, 2017. — С. 386–387.
- [9] **Shankoff, T. A.** Phase holograms in dichromated gelatin / T. A. Shankoff // Appl. Opt. — 1968. — Vol. 7. — P. 2101–2105.
- [10] **Haiducu, M.** Deep-UV patterning of commercial grade PMMA for low-cost, large-scale microfluidics / M. Haiducu, M. Rahbar, I. G. Foulds, R. W. Johnstone, D. Sameoto, M. Parameswaran // Journal of micromechanics and microengineering. — 2008. — Vol. 18.115029. — P. 7.
- [11] **Johnstone, R. W.** Deep-UV exposure of polymethylmethacrylate (PMMA) at 254 nm using low-pressure mercury vapor lamps / R. W. Johnstone, I. G. Foulds, M. Parameswaran // Journal of vacuum science & technology. B. Microelectronics and nanometer structures: processing, measurement, and phenomena. — 2008. — Vol. 26. — № 2. — P. 682–685.
- [12] **McCord, M. A.** SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication / M. A. McCord, M. J. Roops. Editor: P. Rai-Choudhury. — 1997. — Vol. 1: Microlithography. Chapter 2. E Beam Lithography. — P. 139–250.
- [13] **Hoole, C. F.** Negative PMMA as a high-resolution resist—the limits and possibilities / C. F. Hoole, M. E. Welland, A. N. Broers // Semiconductor Science and Technology. — 1997. — Vol. 12. — № 9. — P. 1166–1170.
- [14] **Carbaugh, D. J.** Photolithography with polymethyl methacrylate (PMMA) / D. J. Carbaugh, J. T. Wright, R. Parthiban, F. Rahman // Semiconductor Science and Technology. — 2016. — Vol. 31. — № 2. — P. 025010. — 10 p.
- [15] **Roops, M. J.** Low stress development of polymethylmethacrylate for high aspect ratio structures / M. J. Roops, E. Kratschmer, R. Viswanathan, J. Katine, R. E. Fontana Jr., S. A. MacDonald // Journal of Vacuum Science & Technology. B. Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. — 2000. — Vol. 20. — № 6. — P. 2937–2941.
- [16] **Abbas Arwa.** Nanofabrication Using Electron Beam Lithography: Novel Resist and Applications: Thesis of Master of Applied Science / Abbas Arwa. — Waterloo, Ontario, Canada: University of Waterloo. — 2013. — P. 60.

## Diffraction gratings on a dichromated gelatin-organic polymer composite

*N. M. Ganzherli<sup>1</sup>, I. A. Maurer<sup>1</sup>, S. N. Gulyaev<sup>2</sup>, S. Y. Bykhovskiy<sup>2</sup>, D. R. Khazvalieva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

The results of the transfer of a diffraction grating holographic structure from the layer of dichromated gelatin (DCG) to the polymethylmethacrylate (PMMA) substrate material are presented. The significant increase of a surface relief height up to greater than 1 micron after the application of a MIBK developer for resists is demonstrated.

**Keywords:** Holography, Diffraction optical elements, Organic polymers, Polymethyl methacrylate, Resists, Photoresists.

### 3.3. Голографические сенсоры компонентов водных растворов и биологических жидкостей

*А. В. Крайский<sup>1</sup>, В. А. Постников<sup>2</sup>, Т. В. Миронова<sup>1</sup>, Т. Т. Султанов<sup>1</sup>, А. А. Крайский<sup>1</sup>, М. А. Шевченко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины ФМБА России, Москва, Россия

В докладе рассматриваются различные аспекты, связанные с исследованиями и возможностями применения голографических сенсоров (ГС). По литературным данным проиллюстрирована жизненная важность экспресс-диагностики (point-of-care diagnostic) в медицине. Приводятся данные объема мирового рынка диагностики вообще, доля в нем экспресс-диагностики и темпы их роста. Обсуждаются свойства ГС, их достоинства, их измерительные возможности и возможные области применения. Обсуждаются возможности современной цифровой изобразительной техники, включая смартфоны для совмещения их с ГС. Подробно обсуждаются проблемы анализа содержания глюкозы в плазме и сыворотке крови и сопоставляются с существующими средствами.

**Ключевые слова:** Голографические сенсоры, Глюкоза, Точность определения.

#### Введение

Голографические сенсоры (ГС) были предложены около 20 лет назад [1–2] и в последнее десятилетие привлекают внимание исследователей, поскольку на основе ГС возможно создать новый класс диагностических устройств [3–8].

В последние годы в практической медицине увеличивается потребность в экспресс-диагностике [9]. Здесь сообщается, что в Бордерс (Шотландия) с помощью экспресс-диагностики инфаркта миокарда непосредственно в автомобиле время с момента поступления пациента в лечебное учреждение до начала лечения снизилось в среднем на 2,5 часа. Этим ежегодно спасают более 3 500 жизней. Экспресс-диагностику можно проводить с помощью аппаратуры, основанной на разных методах анализа. Например, глюкометры работают на фотометрическом или электрохимическом принципах. В [10] проводится сравнение мирового производства средств лабораторной диагностики в 2012 и 2017 г. В 2012 г. весь рынок оценивался в 52,5 млрд. долларов, сегмент экспресс диагностики — 15 млрд. долларов или 28,6 %. В 2017 г. прогнозируется все производство 73,6 млрд. долларов, т. е. общий рост на 40,2 %, а сегмент экспресс-диагностики — 22,1 млрд. долларов, т. е. составляет 30 % от всего производства, а увеличение этого сегмента рынка на 47,3 %, т. е. экспресс-диагностика — сильно востребованный сегмент рынка. Подобные оценки приводит маркетинговая компания Markets&Markets для диагностики *in vitro* в целом в 2016 г.: рынок по совокупности продукта (инструменты, реактивы, программное обеспечение) оценивался в 60,22 млрд. долларов, к 2021 г. ожидается 78,7 млрд. долларов. Согласованы с этими прогнозами оценки, этой же компании для более ранних лет [7]. Эти оценки относятся ко всем видам диагностики. Оптические сенсоры, в том числе и сенсоры на фотонных структурах, достаточно давно привлекли внимание исследователей [7] и уже находят применение в экспресс-диагностике в массовом употреблении. При этом в зависимости от типа аналита (тестируемого компонента) и способа его распознавания получены различные чувствительности [7]: рН до 0,01, содержание глюкозы до

0,1 мМ (аминофенилборная кислота) и до 0,5 мМ (глюкозооксидаза), бифенол до  $10^{-9}$  мкМ, цианиды до  $10^{-4}$  мМ, холестерин до 1 нМ, ионы  $Hg^{2+}$  до 10 нМ, температура до 2 °С и многое другое.

Голографические сенсоры — один из видов сенсоров на фотонных структурах. Их специфика в типе структур — в них образуются квазиодномерные интерференционные слои, отражение от которых сосредоточено в небольшом телесном угле и имеет узкополосный спектр длин волн.

#### 1. Что такое голографические сенсоры

ГС позволяют создать новый класс диагностических устройств для определения компонентов растворов биологических жидкостей и газовых смесей. Их разработка и исследования начались в Кембриджском университете коллективом под руководством проф. К. Р. Лоу в 90-е г. [1]. В обзоре 2014 г. [6] так дается определение ГС: это «аналитические устройства, отражающие узкополосный свет от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов, предназначенные для обнаружения и количественного определения аналитов и/или физических параметров». ГС могут применяться в различных областях: в медицине, пищевой промышленности, мониторинге окружающей среды и т. п.

В более узком смысле ГС — это голограммы Денисюка, т. е. многослойные периодические структуры, которые, как правило, изготавливают по фотографической технологии на основе галоидного серебра, концентрация нанозерен которого изменяется периодически. При отражении от такой структуры для света, падающего нормально к слоям, имеется резонансная длина волны, которая равна удвоенному периоду структуры. Типичный спектр отраженного сигнала от сенсора имеет достаточно узкий пик, который хорошо аппроксимируется гауссовой функцией [10]. Характерные ширины: 8–20 нм. В полимерную матрицу встраиваются специальные вещества, при взаимодействии которых с тестируемым компонентом матрица изменяет свою толщину. Вследствие этого, изменяется период слоев и длина волны отраженного света при освещении белым светом. Другими словами, изменяется

цвет сенсора. По этому изменению и можно определять концентрацию тестируемого вещества. При отбеливании голограмм возможно получение более высокой дифракционной эффективности (ДЭ). Сейчас исследуются и другие материалы, и способы изготовления голографических структур, например, применение наноразмерных синтетических цеолитов и 3-х-мерная цифровая печать [8].

В последние годы появилось несколько работ, в которых подведены итоги этапов работ по ГС [4–8]. Среди них выделяется, опубликованный в 2014 г. в Chem. Rev. большой обзор [4], в котором подводятся итоги работ за 20 лет в этой области и обсуждаются проблемы направления и его перспективы.

На основании этих работ можно сделать вывод, что голографические сенсоры на основе «умных» гидрогелей — новый класс диагностических устройств с большими возможностями.

## 2. Что могут измерять голографические сенсоры

С помощью них можно измерять:

- кислотность (рН) водных растворов;
- содержание ионов металлов;
- содержания глюкозы в крови и в других биологических жидкостях, сорбитола, мочевины;
- концентрацию спирта, влажность.

Определять наличие: спор бактерий, метаболитов, роста бактерий;

Проводить анализ: лактата в плазме крови, определять с помощью голографических сенсоров на основе гидрофобной матрицы содержания горючих углеводородных газов в воздухе.

Перспективная проблемная задача — контроль соблюдения заданного температурного диапазона контролируемого объекта при хранении и перевозке!

Возможны и иные применения.

## 3. Достоинства голографических сенсоров

К достоинствам сенсоров относятся:

- достаточно высокая чувствительность, причем для некоторых классов веществ — чувствительность к следовым концентрациям;
- простота работы, обратимость;
- достаточно высокая точность;
- многоканальность, в частности, возможность измерения неоднородных распределений;
- визуальная оценка или точная обработка цифровых изображений;
- легкая модификация сенсора для работы с другими компонентами;
- они дешевы;
- возможность работы в реальном времени;
- возможность работы без добавления химических реагентов;
- отсутствие токсичных продуктов, выделяющихся при работе;
- возможность применения в комбинации с микрофлюидной техникой.

## 4. Где могут применяться голографические сенсоры

Голографические сенсоры могут применяться в различных областях: в медицине, пищевой промышленности, мониторинге окружающей среды, в частности, водных ресурсов, технике и т. п. Могут быть массовые применения в следующих областях.

Контроль работы фильтров питьевой воды на содержание ионов металлов (или иные компоненты) в быту, в полевых условиях при простом визуальном контроле или более точном цифровом с помощью адаптированного смартфона или простого специализированного устройства, т. е. универсальной упрощенной камерой, габариты которой не превосходят размеры смартфона. Такие камеры могут быть очень дешевы при массовом производстве. Применяться они могут при измерении жесткости воды. Это важно при избыточной минерализации воды, в местностях с железистой водой.

Возможен контроль содержания глюкозы в организме по слезной жидкости с помощью специализированных контактных линз или по поту. Это позволит резко понизить применение инвазивных методов контроля в быту.

Возможен контроль мочевины в молоке на молочных фермах, контроль воды в авиационном керосине.

В перспективе: можно предполагать контроль заданного температурного диапазона при хранении и перевозке биологических и других препаратов и массово применяться при хранении скоропортящихся продуктов в быту.

## 5. Некоторые свойства голографических сенсоров

Основной целью нашей работы была разработка сенсоров для определения концентрации глюкозы в крови [10]. В работе использовали обычную схему для записи голограмм во встречных пучках. Для получения голограмм применялся обычный фотографический процесс с получением нанозерен металлического серебра при экспонировании фотоэмульсии в излучении гелий-неонового лазера с длиной волны 632,8 нм или второй гармоники твердотельного лазера с выходной длиной волны 533 нм по схеме на встречных пучках в растворе, с тем, чтобы период слоев после обработки в рабочих условиях давал пики отражения в рабочей области спектрометра. Нами исследовался ряд матриц различных составов и конструкций на основе акриловой кислоты, чувствительных к рН и ионной силе, а на основе аминофенилборной кислоты — чувствительных и к глюкозе.

На рисунке 1 показаны отклики сенсора на основе акриловой кислоты на ионную силу в присутствии ряда катионов в широком диапазоне концентраций от  $10^{-7}$  до 0,3 М. Видно, что характер откликов различен для различных типов катионов. Для щелочных ионов отклик не монотонен, имеется четко выраженный максимум в области тысячных долей рН, по откликам двухвалентные ионы Mn, Mg, Sr образуют другую группу. Отклик

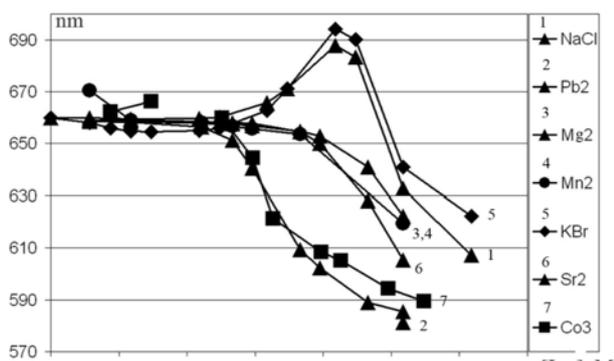


Рис. 1. Примеры отклика ГС для ионов некоторых 1-3-валентных металлов [3] в зависимости от концентрации

двухвалентного иона свинца близок к отклику трехвалентного кобальта и при больших концентрациях превосходит его. Они образуют группу с большей чувствительностью сенсора к ней.

На рисунке 2 показаны спектры отражения в дистиллированной воде после переноса в нее сенсора из раствора цитрата ( $\lambda = 860$  нм ИК); в дистиллированной воде (стационарное состояние,  $\lambda = 724$  нм темно-красный свет); водопроводной воде после фильтра Аквафор ( $\lambda = 712$  нм темно-красный); водопроводной воде после фильтра Барьер ( $\lambda = 676$  нм красный); холодной водопроводной воде ( $\lambda = 615$  нм светлокрасный); минеральной воде, содержащей ионы  $[Ca^{2+}] 3 \times 10^{-3}$  М ( $\lambda = 585$  нм желтый); растворе соли свинца в дистиллированной воде  $[Pb^{2+}] 5 \times 10^{-3}$  М ( $\lambda = 542$  нм зеленый). Видно, что голографические сенсоры вполне могут быть тестерами воды и позволяют определять пригодность бытовых фильтров воды по их способности очищать ее от ионов металлов.

На рисунке 3 показаны отклики на концентрацию этилового спирта сенсора на основе акриловой кислоты и аминифенилборной кислоты в диапазоне концентраций 0–47 %. Видно, что сенсор на основе акриловой кислоты в указанном диапазоне перекрывает практически весь видимый спектр. Следует отметить, что выбором условий записи голограммы можно

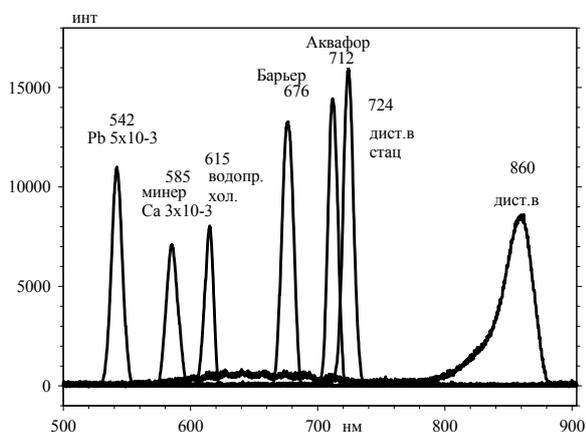


Рис. 2. Спектры отражения сенсора при наличии различных ионов металлов в воде [3]

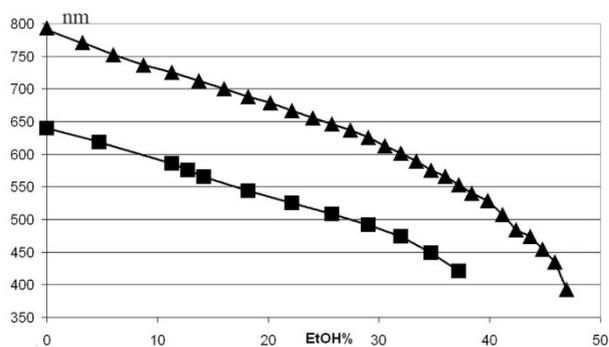


Рис. 3. Отклик на концентрацию этилового спирта сенсоров на основе акриловой кислоты (верхняя кривая) и аминифенилборной кислоты (нижняя кривая) [3]

управлять положением кривой по отношению к оси длин волн.

### 6. К вопросу о точности определения длины резонансной волны

Точность измерения длины волны зависит в первую очередь от спектральной ширины полосы коэффициента отражения голограммы. Он в свою очередь зависит от толщины голографического слоя при малой ДЭ и от величины ДЭ при большой ее величине. В последнем случае приходится пользоваться компьютерным расчетом.

В случае малой амплитуды модуляции показателя преломления, т. е. малой ДЭ, ширина наименьшая. В этом случае ширина линии отражения дается простым выражением. Из него легко определить число интерференционных слоев, т. е. толщину голографического слоя.

На рисунке показан экспериментальный спектр отражения сенсора и его аппроксимация гауссовой функцией. При аппроксимации пика отражения в экспериментальном слое определяется ширина отклика, и по формуле определяются эффективное число интерференционных слоев и эффективная толщина слоя.

Для малой ДЭ связь между параметрами голографического слоя дается выражением:

$$\delta\lambda = 0,886 \lambda^2 / (2nD) = 0,886 \lambda / N, \quad (1)$$

где  $\delta\lambda$  — спектральная ширина линии отражения,  $\lambda$  — длина волны,  $D$  — толщина слоя,  $N = 2nD/\lambda$  — число интерференционных слоев.

Для характерного экспериментального спектра отражения  $\delta\lambda = 0,677$  мкм (красный),  $n = 1,33$  — показатель преломления гидрогелевого слоя, ширина пика  $\delta\lambda = 8$  нм, из выражения (1) вычисляется толщина голографического слоя  $D = 19$  мкм. В [3] показано, что при титровании при резком уменьшении кислотности раствора происходит резкое, почти на порядок, увеличение ДЭ. Вследствие этого может происходить сильное искажение формы пика отражения и увеличение его ширины. При этом формула (1) перестает действовать, поскольку отклонения от нее становятся заметными при ДЭ больше 0,1 [10]. В этом случае для

расчетов спектра коэффициента отражения мы использовали компьютерную модель. Решалась краевая задача для волнового уравнения с периодическим изменением диэлектрической проницаемости. Для описания диэлектрической проницаемости композитной среды эмульсии с нанозернами серебра использовалась формула Максвелла — Гарнетта [11–12]. Определение параметров ГС делалось методом подгонки параметров вычисляемого с помощью компьютерной модели пика отражения к параметрам экспериментального спектра отражения [10].

### 7. Об определении содержания глюкозы с помощью голографического сенсора

Основной проблемой при применении голографических сенсоров для анализа содержания глюкозы в сыворотке крови было сильное снижение чувствительности к глюкозе из-за наличия солей щелочных металлов. Отклик сенсоров глюкозы линейно зависит от содержания глюкозы в диапазоне концентраций от 0 до 20 ммоль/л в модельных растворах фосфатного буфера. Величина отклика зависит от ионного состава раствора, так, при увеличении ионной силы раствора (содержания NaCl) от 0 до 0,15 М чувствительность сенсоров снижается более чем на порядок от 6 нм/ммоль до 0,44 нм/ммоль. Это существенно ограничивает возможности практического применения сенсоров глюкозы для определения содержания глюкозы в биологических жидкостях, как правило, содержащих заметное количество различных ионов. Линейны и отклики сенсоров в аналогичных модельных растворах шестиатомного спирта сорбита, который является продуктом восстановления глюкозы. Чувствительность этих сенсоров к сорбиту при наличии ионов металлов почти на два порядка выше чувствительности к глюкозе, при этом, при увеличении содержания ионов в растворе, величина отклика снижается примерно в два раза. При правильном подборе реакций, приводящих к восстановлению глюкозы до сорбита в биологических жидкостях, на основе голографических сенсоров можно разработать существенно более чувствительные аналитические системы для определения глюкозы.

Для этого проба сыворотки крови смешивалась с раствором, содержащим модификатор для восстановления глюкозы до сорбита. На рисунке 4 треугольниками показаны отклики сенсора в модифицированных таким образом образцах сыворотки крови. Видно, что они практически совпадают с откликами в контрольных растворах сорбита в том же буфере. Чувствительность к содержанию глюкозы составляет более 400 нм/мМ. Стандартное отклонение (СО) при измерении длины волны (прецизионность) при ширине линии около 10 нм составило 0,05 нм. Это обеспечивает СО для концентрации глюкозы — до  $1,0 \times 10^{-4}$  мМ, т. е. 0,1 мкМ.

Для голограммы, использованной нами в реальном эксперименте с микрофлюидной техникой СО со-

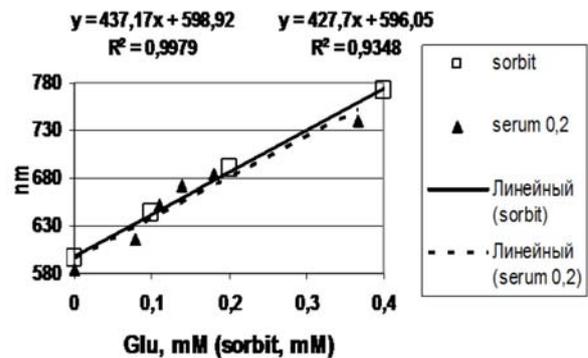


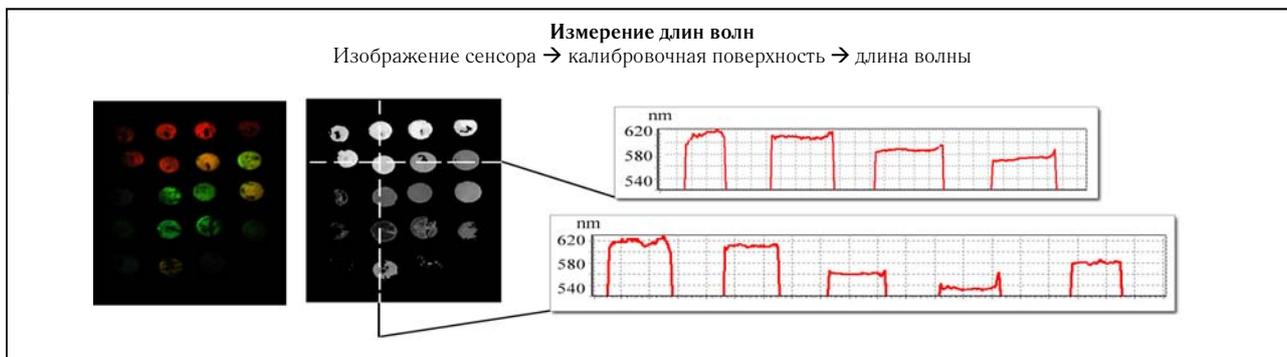
Рис. 4. Отклик сенсоров глюкозы в растворах сорбита и разбавленных модифицированных образцах сыворотки крови

ставило  $8,0 \times 10^{-4}$  мМ, в пересчете на исходный образец плазмы крови составляет 0,015 мМ глюкозы. Требования по международному стандарту ISO15197–2013 для электронных глюкометров: не менее 95 % результатов глюкометра должны отклоняться от результатов эталонного анализатора составляющая при содержании глюкозы свыше 5,55 ммоль/л не более, чем на 15 %, а при содержании глюкозы до 5,55 ммоль/л — 0,83 ммоль/л. Т. о. оказывается, что при содержании глюкозы 5,55 ммоль/л, что лежит в границах нормы, то в пределах этого требования могут оказаться реальные измерения 6,38 ммоль/л.

Для эталонного анализатора «YSI 2300 STAT PLUS» — предел относительного СО измерений не превышает  $\pm 2$  %. Это для содержания глюкозы 5,55 ммоль/л может при отклонении на 3 СО иметь измерения 5,86. Для голографического сенсора, с которым были проведены измерения, СО — 0,015 мМ. Поэтому измерения с отклонением до 3 СО не будет превышать 5,59 мМ. Т. о. для ГС СО значительно лучше, чем для эталонного анализатора. Реальное отклонение в эксперименте с модельным раствором составило около 3 %, т. е. на уровне эталонного прибора. По концентрационным зависимостям видно, что это отклонение явно носит систематический характер и значительно больше СО, т. е. прецизионности определения длины волны. Это мы связываем с неточностями навесок небольших количеств веществ и объемов растворов.

### 8. Об определении длины волны отраженного сенсором излучения с помощью колориметрического метода

С помощью определенной калибровки для узкополосного излучения можно по цветности цифрового изображения поверхности сенсора определить длину волны этого излучения [14–15]. На рисунке 5 показана одна из фотографий спектра лампы накаливания, по набору которых строится показанная на том же рисунке калибровочная поверхность. С помощью этой поверхности по цветовым данным пикселя цветового изображения (интенсивности I и его цветности Hue) определяется соответствующая этим данным длина



Вверху: слева один спектр лампы накаливания из набора спектров, по которым строится калибровочная поверхность (вверху справа).  
Внизу: слева — изображение набора ячеек ГС с различным содержанием аналита, правее — карта длин волн этого изображения, справа — горизонтальное и вертикальное сечения карты длин волн

Рис. 5. Применение колориметрического метода определения длины волны, отражаемого сенсором излучения

волны излучения для этого пикселя. Так для всех точек изображения строится карта длин волн.

Внизу слева показаны фотография и карта длин волн для чипа с голографическими сенсорами с 24-мя ячейками, в которых находился аналит в различной концентрации, справа показаны горизонтальное и вертикальное сечение этой карты.

Колориметрический метод можно применять для цифровых изображений, полученных с помощью любых цифровых устройств: бытовых фотоаппаратов, смартфонов (рисунок 6), WEB-камер, камер слежения, научных камер и т. п.

Смартфон в сочетании с дифракционной решеткой для считывания спектра применен в [16]. При этом принцип работы его был другой, поскольку с длиной волны связывалось положение пикселя в спектре, развернутом по пространству голографической решеткой, т. е. цифровой приемник смартфона использовался просто как пространственно-чувствительный датчик.

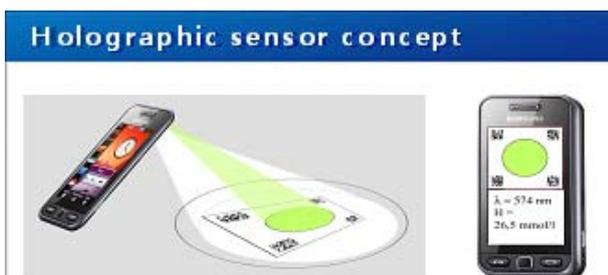


Рис. 6. Крайский А.В., Постников В.А., Миронова Т.В. — 2013 предложения использования смартфона для регистрации длины волны отклика ГС и определения содержания аналита

Другой, чисто цветовой принцип работы смартфона был использован в [17].

На рисунке 7 показано сравнение результатов измерения кинетики перехода для сенсора из одного состояния в другое с помощью спектрометра (кресты) и колориметрическим способом (синие ромбы). Переход проводился в одно и то же состояние (раствор сорбитола в фосфатном буфере) из разных начальных состояний: уксусная кислота, ромбы и фосфатный буфер, кресты. Вследствие этого на начальном этапе (до 85 с) данные различаются. На следующем участке видно, что колориметрический способ не уступает по точности измерениям спектров с помощью спектрометра.

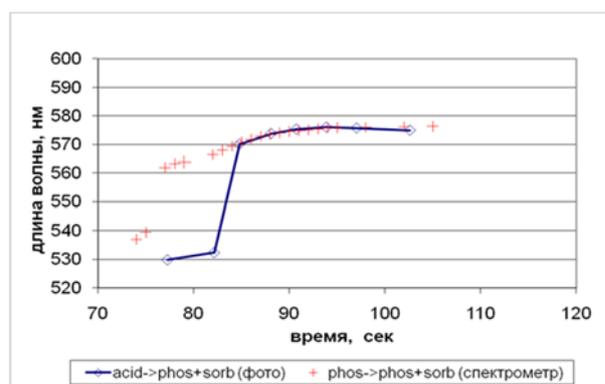


Рис. 7. Сравнение результатов спектральных и колориметрических измерений переходов сенсора в одинаковое конечное состояние из разных начальных состояний

### Заключение

Т. о. голографические сенсоры могут использоваться для анализа различных веществ. Сенсоры обладают пространственной многоканальностью, достоинства которой легко реализуются параллельной обработкой при использовании колориметрического метода обработки цифровых изображений поверхности сенсора.

По опыту работы с глюкозой можно сделать вывод, что можно находить способы повышения чувствительности применением специфических для данного аналита реакций. Поэтому нам представляется возможным при дальнейших разработках предусматривать определение и других веществ, в частности, других важных компонентов биологических жидкостей. Это

позволит создавать мощные дешевые, простые в эксплуатации, малоразмерные и легкие измерительные комплексы, которые можно применять в быту, в полевых условиях, на производстве и т. д.

Мы считаем, что в первом приближении основные проблемы по разработке анализатора глюкозы решены на уровне НИР.

Далее требуется детальное сравнение этих анализаторов с существующими на настоящий момент. В случае признания их преимущества пока имеется возможность провести технологическую проработку производства этих сенсоров и их внедрения в практику. При этом имеет смысл ставить задачу шире создания анализатора на одно вещество и проводить разработку комплексного анализатора ряда значимых анализируемых компонентов.

### Список источников

- [1] **Патент № 1995 026 499 AI WO.** Hologram used as a sensor / С. R. Lowe, R. B. Millington, J. Blyth, A. G. Mayes. — Оpubл. 5.10.1995.
- [2] **Toal, V.** Introduction to Holography / V. Toal. — Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. — P. 441.
- [3] **Крайский, А. В.** Голографические сенсоры для диагностики компонентов растворов / А. В. Крайский, В. А. Постников, Т. Т. Султанов, А. В. Хамидулин // Квантовая электроника. — 2010. — Том 40. — № 2. — С. 178–182.
- [4] **Mihaylova, E.** Research on Holographic Sensors and Novel Photopolymers at the Centre for Industrial and Engineering Optics / E. Mihaylova, D. Cody, I. Naydenova, S. Martin, V. Toal // Holography: Basic Principles and Contemporary Applications, Ed. by Dr. Emilia Mihaylova. — InTech, 2014. — P. 89–102. — ISBN 978-953-51-1117-7. — DOI: 10.5772/56061.
- [5] **Postnikov, V. A.** Holographic Sensors for Detection of Components in Water Solutions / V. A. Postnikov, A. V. Kraiskii, V. I. Sergienko // Holography: Basic Principles and Contemporary Applications, Ed. by Dr. Emilia Mihaylova. — InTech, 2013. — P. 103–128. — ISBN 978-953-51-1117-7. — DOI: 10.5772/53564.
- [6] **Yetisen, A. K.** Holographic Sensors: Three-Dimensional Analyte-Sensitive Nanostructures and Their Applications / A. K. Yetisen, I. Naydenova, F. da Cruz Vasconcellos, J. Blyth, C. R. Lowe // Chem. Rev. — 2014. — Vol. 114. — № 20. — P. 10654–10696.
- [7] **Yetisen, A. K.** Photonic hydrogel sensors / A. K. Yetisen, H. Butt, L. R. Volpatti, I. Pavlichenko, M. Humar, S. J. Kwok, H. Koo, K. S. Kim, I. Naydenova, A. Khademhosseini, S. K. Hahn, S. H. Yun // Biotechnol Adv. — 2016. — Vol. 34. — № 3. — P. 250–271.
- [8] **Zawadzka, M.** Photonic Materials for Holographic Sensing / M. Zawadzka, T. Mikulchuk, D. Cody, S. Martin, A. K. Yetisen, J. L. Martinez-Hurtado, H. Butt, E. Mihaylova, H. Awala, S. Mintova, S. H. Yun, I. Naydenova // Photonic Materials for Sensing, Biosensing and Display Devices: Springer Series in Materials Science, ed. by M. J. Serpe et al. — 2016. — DOI: 10.1007/978-3-319-24990-2\_11.
- [9] URL: [http://www.fedlab.ru/upload/medialibrary/c2f/stebolina-yuv-\\_-ekspress\\_diagnostics-rostov\\_na\\_donu-02-iyunya-2015](http://www.fedlab.ru/upload/medialibrary/c2f/stebolina-yuv-_-ekspress_diagnostics-rostov_na_donu-02-iyunya-2015).
- [10] Крайский, А. А. Определение параметров голографического слоя по его спектральным характеристикам / А. А. Крайский, А. В. Крайский // Квантовая электроника. — 2016. — Том 46. — № 6. — С. 558–566.
- [11] **Maxwell Garnett, J. C.** Colours in Metal Glasses and in Metallic Films / J. C. Maxwell Garnett // Phil. Trans., A. — 1904. — Vol. 203. — P. 385–420.
- [12] **Maxwell Garnett, J. C.** Colours in Metal Glasses, in Metallic Films, and in Metallic Solutions. II / J. C. Maxwell Garnett // Phil. Trans., A. — 1906. — Vol. 205. — P. 237–288.
- [13] **Зайцева, Г. В.** / Г. В. Зайцева, А. П. Зарицкий, М. М. Кириченко, М. А. Краснова, А. В. Крайский, В. А. Постников, М. А. Шевченко // Краткие сообщения по физике. — М.: ФИАН, 2017. — Том 44. — № 6. — С. 3.
- [14] **Крайский, А. В.** Измерение поверхностного распределения длины волны узкополосного излучения колориметрическим методом / А. В. Крайский, Т. В. Миронова, Т. Т. Султанов // Квантовая электроника. — 2010. — Том 40. — № 7. — С. 652–658.
- [15] **Крайский, А. В.** Измерение длины волны узкополосного излучения при обработке цифровых фотографий в гав-формате / А. В. Крайский, Т. В. Миронова, Т. Т. Султанов // Квантовая электроника. — 2012. — Том 42. — № 12. — С. 1137–1139.
- [16] **Gallegos D.** Label-free biodetection using a smartphone / D. Gallegos, K. D. Long, H. Yu, P. P. Clark, Y. Lin, S. George, P. Natha, B. T. Cunningham // Lab on a Chip. — 2013. — Vol. 13. — P. 2124–2132. — DOI: 10.1039/c3lc40991k.
- [17] **Martinez-Hurtado, J. L.** Multiplex Smartphone Diagnostics / J. L. Martinez-Hurtado, A. K. Yetisen, S.-H. Yun // Multiplex Biomarker Techniques: Methods and Applications: Methods in Molecular Biology; ed. by P. C. Guest. — 2017. — Vol. 1546. — P. 295–302 DOI: 10.1007/978-1-4939-6730-8\_26.

## **Holographic sensors diagnostics of components in aqueous solutions and biological fluids**

*A. V. Kraiski<sup>1</sup>, V. A. Postnikov<sup>2</sup>, T. V. Mironova<sup>1</sup>, T. T. Sultanov<sup>1</sup>, A. A. Kraiski<sup>1</sup>, M. A. Shevchenko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Federal Scientific and Clinical Center of Physical-Chemical Medicine of FMBA Russia, Moscow, Russia

The report examines various aspects related to research and possibilities of using holographic sensors (HS). The literature data illustrate the vital importance of the express-diagnostics (point-of-care diagnostic) in medicine. The data on the bulk of the world market of diagnostics in general, the share of express diagnostics in it and the rates of their growth are given. The properties of HS, their advantages, their measuring capacities and possible applications are discussed. The possibilities of modern digital imaging technology including smartphones for combining them with the HS are discussed. The problems of analyzing the level of glucose in plasma and serum are discussed in detail and compared with the existing diagnostic means.

**Keywords:** Holographic sensors, Glucose, Measurement accuracy.

### 3.4. Запись синтезированных волноводных голограмм для большеразмерных интегральных осветителей

С. С. Копёнкин<sup>1</sup>, Ю. П. Бородин<sup>1</sup>, А. В. Морозов<sup>2</sup>, С. Е. Дубынин<sup>1</sup>, А. Н. Путилин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский технологический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup> Исследовательский центр Самсунг, Москва, Россия

<sup>3</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Приводятся результаты исследования записи синтезированных голографических осветителей. Исследовалась запись лазером с длиной волны 442 нм на фоторезисте, нанесенном на поверхность эталонной по плоскостности подложки, с последующим перенесением рельефа на волновод фотополимеризующейся композицией. Записывались голограммы до 10 дюймов по диагонали, воспроизведение осуществлялось RGB лазерами.

**Ключевые слова:** Голография, Волноводная голография, ПВО, Дифракционные оптические элементы.

#### Введение

Повышенный интерес к голографическим 3D-дисплеям, наблюдаемый в индустрии дисплеев, вызвал активизацию исследований в области когерентных систем обработки информации. В конце 80-х годов эта область активно развивалась в связи с большими надеждами на оптические вычислительные машины [1]. Особенно востребованы сейчас результаты исследований по созданию интегральных осветителей для оптических когерентных процессоров [2]. В нашей статье приводятся результаты исследования записи большеразмерных планарных голографических осветителей для голографического Real 3D дисплея.

#### Запись синтезированных голографических осветителей

Увеличение размеров голографических дисплеев является естественным следствием роста разрешения и уровня интеграции пространственных модуляторов света и разработки мощных и компактных когерентных RGB источников. Одновременно растут и габариты осветительных систем, единственной возможностью довести голографические дисплеи до массового выпуска, это разработка планарных большеразмерных когерентных осветителей (BLU), не отличающихся по своим габаритам от обычных backlight осветителей ЖК дисплеев. В работе исследовалась запись гологра-

фических осветителей с многократным воспроизведением [3], для изготовления использовалась установка экспонирования, приведённая на рисунке 1. В качестве источника света использовался He—Cd лазер (442 нм), регистрирующей средой для записи рельефных голограмм был выбран голографический фоторезист, аналог AZ1440. Размер отдельной микроголограммы (хогеля-Hogel) мог варьироваться от долей до 12 мм. Регистрирующая среда поливалась на эталонные по плоскостности подложки с зачерненной нижней поверхностью, далее подложка размещалась на двухкоординатном прецизионном столе с управлением от РС. Размер записываемых голографических оптических элементов ограничивался диапазоном перемещений стола 250 на 180 мм. В процессе экспонирования и в зависимости от необходимой конфигурации дифрагированных пучков могла регулироваться локальная дифракционная эффективность, наложение или ориентация экспонированных хогелей. Для вывода однородного по интенсивности выходного пучка необходимо увеличивать ДЭ отдельных голограмм. Таким образом общая дифракционная эффективность будет определяться количеством переотражений и максимальной ДЭ голографической регистрирующей среды.

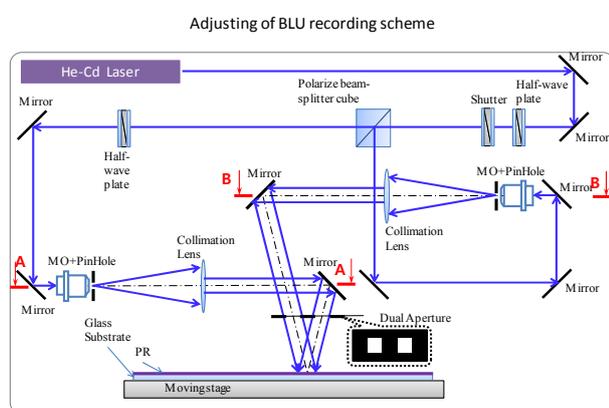


Рис. 1. Схема записи синтезированной голограммы для планарного осветителя (BLU)

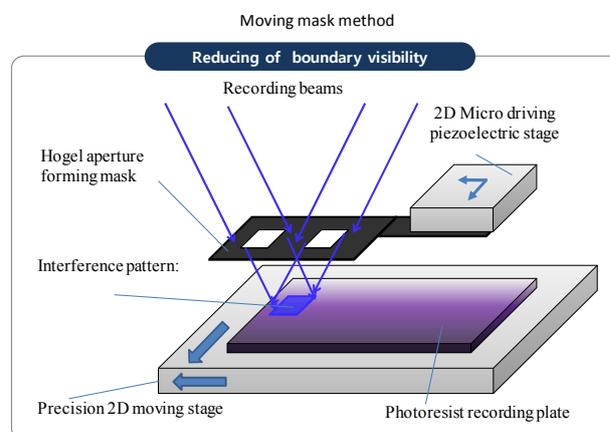


Рис. 2. Схема использования метода движущейся апертурной маски для уменьшения заметности границ микроголограмм (хогелей)

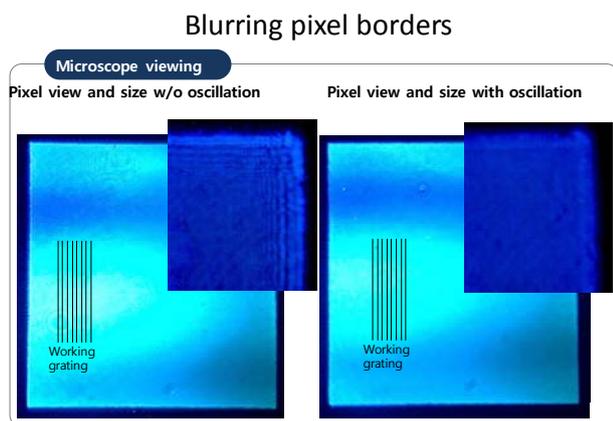


Рис. 3. Запись пространственных частот на границе холелей

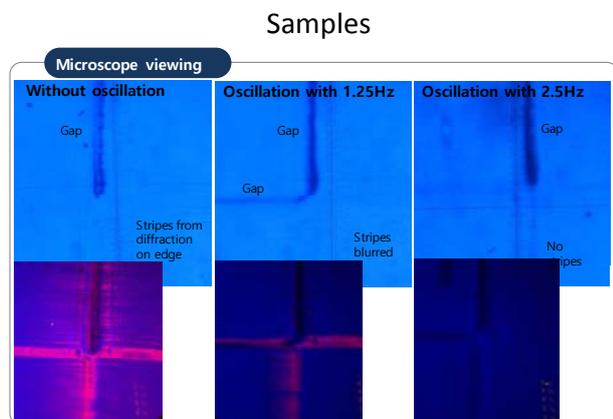


Рис. 4. Влияние вида движения маски на видимость границы холелей

Апертура регистрируемого холеля определялась апертурной маской, распложенной в непосредственной близости, но не в контакте с регистрирующей средой.

Благодаря дифракции на краю маски на регистрируемом холеле наблюдалась запись полосатой структуры — рисунок 3 слева, из-за которой в общем вос-

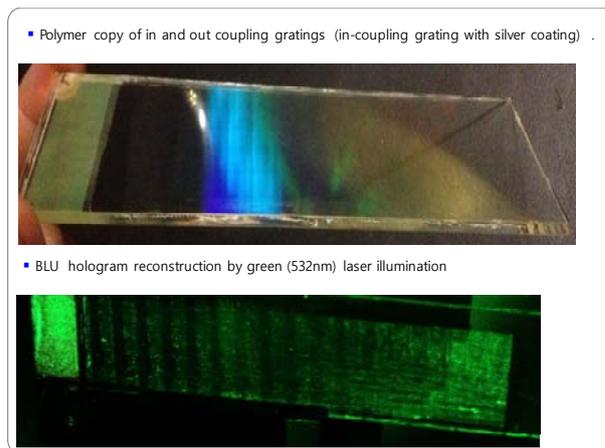


Рис. 5. Вид голографического BLU с уменьшенной видимостью границ холелей

становленном пучке видны были мешающие дифракционные порядки и границы отдельных холелей мешали наблюдению голографического изображения.

Для уменьшения заметности границ микроголограмм была использована запись микроголограмм при движущейся апертурной маски — рисунок 2. Движение маски контролировалось пьезоподвижкой, управляемой от РС.

На рисунке 3 показаны микрофотографии границы холелей для неподвижной и движущейся маски. Для оптимального уменьшения видимости границы холелей применялось сложное двухкоординатное движение маски с определенной частотой — результаты показаны на рисунке 4.

### Заключение

Использованный метод уменьшения заметности границ холелей показал хорошие результаты, на рисунке 5 показан общий вид записанных синтезированных голограмм и их работа в схеме коллимации когерентного пучка зеленого лазера.

Общая дифракционная эффективность синтезированных голограмм достигала 25 % при однородности выходного пучка 80 %.

### Список источников

- [1] Престон, К. Когерентные оптические вычислительные машины / К. Престон. Пер. с англ. — М.: Мир, 1974. — 400 с.
- [2] Putilin, A. N. Waveguide holograms with white light illumination / A. N. Putilin, V. N. Morozov, Q. Huang, H. J. Caulfield // Optical Engineering. — 1991. — Vol. 30. — № 10. — P. 1615–1619. — DOI: 10.1117/12.55969.
- [3] Yan, Z. Virtual display design using waveguide hologram in conical mounting configuration / Z. Yan, W. Li, Y. Zhou, M. Kang, Z. Zheng // Optical Engineering. — 2011. — Vol. 50. — № 9. — P. 094001. — 8 p. — DOI: 10.1117/1.3617409.

## Recording of synthesized waveguide holograms for large-scale integrated illuminators

*S. S. Kopenkin<sup>1</sup>, Y. P. Borodin<sup>1</sup>, A. V. Morozov<sup>3</sup>, S. E. Dubynin<sup>3</sup>, A. N. Putilin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Moscow Technological University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Samsung Research Center, Moscow, Russia

The results of the investigation of synthesized holographic illuminators recording are presented. We investigated the recording by laser with a wavelength of 442 nm on a photoresist deposited on the surface of precision reference substrate, then relief was copied to a waveguide with a photopolymerizable composition. Recorded holograms was up to 10 inches size, the reconstruction of recorded BLU was performed by RGB lasers.

**Keywords:** Holography, Waveguide Holography, TIR holograms, Diffraction Optical Elements.

### 3.5. Влияние дискретности синтезированных голограмм-проекторов на глубину резкости формируемых с их помощью изображений

С. Н. Корешев, М. А. Фролова

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты выполненного методом математического моделирования экспериментального исследования влияния параметров дискретизации объекта на зависимость глубины резкости восстановленного изображения от ширины элементов структуры объекта. Установлено, что использование при синтезе голограммы максимально допустимого исходя из частотно-пространственного анализа дискретной голограммы размера пикселя объекта приводит к обратной, по сравнению с традиционной для оптических систем, зависимости глубины резкости синтезированной голограммы от размера элемента структуры объекта. Даны рекомендации по выбору параметров дискретизации объекта, обеспечивающих традиционный для оптических систем ход зависимости глубины резкости от ширины элементов структуры объекта.

**Ключевые слова:** Синтез голограмм, глубина резкости восстановленного изображения, дискретизация объекта, ширина элементов структуры объекта, зависимость глубины резкости от параметров дискретизации.

#### Введение

Принципиальная дискретность цифровых и синтезированных голограмм оказывает существенное влияние на их изображающие свойства [1, 2]. Причем, в случае синтезированных голограмм, представляющих собой дискретные голограммы дискретных объектов, характеристики восстановленного изображения во многом определяются параметрами дискретизации объекта. Так в [3] показано, что в зависимости от периода дискретизации объекта, выбранного при синтезе голограммы, линии, составляющие восстановленное изображение объекта могут быть либо сплошными, либо пунктирными. Причем, сплошные линии в изображении будут реализовываться в случае выбора периода дискретизации объекта в 4 раза меньшем, чем период, определяемый теоремой Котельникова. Это происходит из-за несовпадения требований к выбору периода дискретизации объекта, предъявляемых теоремой Котельникова и критерием разрешения Рэля. Представление объекта в виде конечной совокупности точечных объектов оказывает влияние не только на разрешение в восстановленном изображении, но на его глубину резкости. Причем, влияние оказывается тем большим, чем меньшее число точек используется для отображения элементов структуры объекта.

#### 1. Глубина резкости в традиционной оптике

Глубина резкости представляет собой один из важнейших параметров оптических систем. Определим ее для описанного выше случая внеосевой голограммы с плоской опорной волной, падающей под углом на плоскость синтеза голограммы. При этих условиях числовая апертура излучения, дифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры фотошаблона, может быть описана с помощью следующего выражения

$$A = n \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_t}, \quad (1)$$

где  $A$  — числовая апертура пучка,  $n$  — показатель преломления среды между фотошаблоном и голограм-

мой (для воздуха  $n = 1$ ),  $\alpha$  — апертурный угол дифрагировавшего излучения,  $\lambda$  — рабочая длина волны;  $a_t$  — характеристический размер фотошаблона, т. е. минимальный размер элемента его структуры. Из интерференционной теории формирования изображения следует, что глубина резкости формируемого изображения не может превышать значения, описываемого выражением [4]

$$|b| \ll \frac{2\lambda n}{A^2}. \quad (2)$$

В оптике при расчете значения глубины резкости реальных оптических систем традиционно пользуются более строгим выражением [5]

$$b = \pm \frac{\lambda n}{2A^2}. \quad (3)$$

Из представленных выражений видно, что чем меньше рабочая длина волны и больше числовая апертура, тем меньше глубина резкости получаемого изображения.

#### 2. Глубина резкости изображения, формируемого с помощью синтезированной голограммы

Исследование влияния дискретности синтезированной голограммы на глубину резкости формируемого с ее помощью изображения проводилось методом численного эксперимента. Оно включало в себя синтез и восстановление голограмм объекта, представляющего собой совокупность прозрачных линий различной ширины на непрозрачном экране. Работа выполнялась с помощью специализированного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов [6] при следующих, если это не оговорено особо, физических и геометрических параметрах синтеза и восстановления голограмм. Рабочая длина волны голограмм 13,5 нм, размер голограмм  $435 \times 435$  при размерах пикселей  $20 \times 20$  нм<sup>2</sup>, Размер пикселей в плоскости объекта  $80 \times 80$  нм<sup>2</sup>. Угол падения параллельного опорного пучка  $14,7^\circ$ , расстояние между плоскостью объекта и



Рис. 1. Внешний вид объекта

плоскостью регистрации голограмм 20,4 мкм. Внешний вид объекта представлен на рисунке 1.

Он представлял собой, как уже указывалось ранее, совокупность прозрачных линий различной ширины. Длина этих линий в 5 раз превышала их ширину. Самая тонкая линия имела размеры  $1 \times 5$  пикселей размером  $80 \times 80 \text{ нм}^2$ . Вторая по ширине линия имела размеры  $2 \times 10$  пикселей того же размера. Следующая  $3 \times 15$  пикселей, затем  $4 \times 20$  пикселей и последняя линия имела размеры  $5 \times 25$  пикселей. Таким образом, ширина линий объекта была равна 80 нм, 160 нм, 240 нм, 320 нм и 400 нм. Методика исследования глубины резкости восстановленного изображения и ее зависимости от ширины элемента структуры объекта включала в себя синтез, восстановление голограммы и последующую оценку качества восстановленного изображения объекта после его пороговой обработки.

В качестве критерия качества при этом использовался интервал порогов, при котором структура восстановленного объекта практически не отличалась от структуры исходного объекта. Чем шире интервал, тем выше качество восстановленного изображения. Восстановление голограммы осуществлялось при расстоянии от объекта до голограммы, как равному тому, которое было выбрано при синтезе, так и при расстояниях, отличавшихся от него на величину, достигавшую  $\pm 600$  нм. Шаг изменения расстояния составлял 50 нм. Полученные результаты исследования иллюстрирует рисунок 2. На нем представлены графики зависимости допустимого интервала порогов от ширины линий объекта. По оси абсцисс здесь отложена разность расстояний от голограммы до объекта при синтезе голограммы и от голограммы до плоскости наблюдения объекта при ее восстановлении. По оси ординат — допустимый интервал порогов, т. е. количество допустимых градаций серого, которые могли быть использованы в качестве порога при пороговой обработке восстановленного изображения. Из полученных данных следует, что при выбранных параметрах дискретизации голограммы и объекта глубина резкости восстановленного изображения слабо зависит от ширины линий объекта. Причем, эта зависимость противоположна той, что наблюдается в традиционной оптике и описывается приведенными выше выражениями. Указанный вывод подтверждают и данные, приведенные в таблице 1. В ней представлены значения глубины резкости для элементов структуры объекта различной ширины, рассчитанные с помощью выражения (3) и определенные в результате численного эксперимента и соответствующие нулевому интервалу порогов.

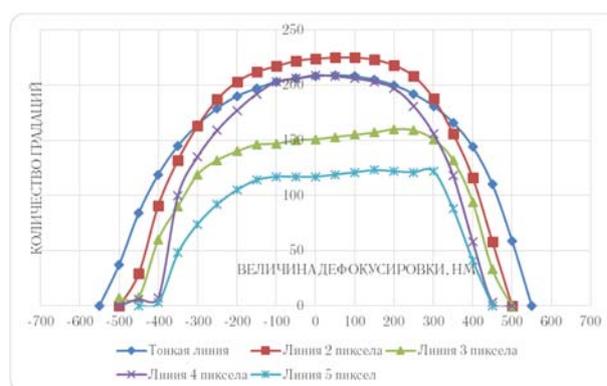


Рис. 2. График зависимости качества изображения от дефокусировки при восстановлении объектов разной толщины

Отметим, что все данные, приведенные в третьем столбце таблицы 1, хорошо согласуются с приведенной в первой строке второго столбца глубиной резкости линии, шириной в 1 пиксель. Об этом же свидетельствуют и приведенные выше графики, демонстрирующие практическую неизменность интервала порогов для всех кривых в пределах величины дефокусировки, равной, примерно,  $\pm 237$  нм. Отличие данных, приведенных во 2–5 строках столбцов 2 и 3, объясняется, по-видимому, несовпадением требований, предъявляемых к выбору периода дискретизации объекта на основании пространственно-частотного анализа дискретной голограммы и на основании критерия разрешения точечных изображений Релея [3]. Действительно, выбранный исходя из пространственно-частотного анализа при указанных выше параметрах синтеза голограммы размер пикселя объекта, равный  $80 \times 80 \text{ нм}^2$ , приводит к представлению при синтезе голограммы широкой, состоящей из нескольких пикселей, линии объекта в виде конечного набора параллельных узких щелей, шириной в 1 пиксель. Этим и объясняется чрезвычайно слабая зависимость глубины резкости синтезированной голограммы от ширины линии объекта, наблюдаемая на рисунке 2. С целью проверки сформулированной выше гипотезы было проведено исследование влияния периода дискретизации объекта, т. е. размера его пикселя, на глубину резкости синтезированных голограмм.

При указанных выше параметрах синтеза была синтезирована голограмма объекта, представленного на рисунке 1, при размере пикселя объекта  $20 \times 20 \text{ нм}$ , т. е. в 4 раза меньшем размере пикселя, по сравнению с тем размером, который был определен исходя из про-

Таблица 1. Значение глубины резкости

Ширина линий, нм/пиксели	Глубина резкости, рассчитанная, нм	Глубина резкости, определенная экспериментально, нм
80/1	$\pm 237$	$\pm 550$
160/2	$\pm 950$	$\pm 525$
240/3	$\pm 2133$	$\pm 500$
320/4	$\pm 3792$	$\pm 475$
400/5	$\pm 5925$	$\pm 400$

Таблица 2. Значение глубины резкости голограмм, синтезированных при размере пикселя объекта  $20 \times 20 \text{ нм}^2$ 

Ширина линий, нм/пиксели	Глубина резкости, рассчитанная, нм	Глубина резкости, определенная экспериментально, нм
80/4	$\pm 237$	$\pm 550$
160/8	$\pm 950$	$\pm 700$
240/12	$\pm 2133$	$\pm 1200$

странственно-частотного анализа дискретной голограммы. Результаты измерений глубины резкости синтезированной голограммы для линий различной ширины представлены в таблице 2. Приведенные данные свидетельствуют о существенной зависимости глубины резкости синтезированных голограмм от параметров дискретизации объекта, т. е. от выбранных размеров пикселей и периода их следования. Чем меньше выбранный размер и период следования пикселей при синтезе голограммы, тем ближе к традиционной для оптических систем будет зависимость глубины резко-

сти восстановленного изображения от размера элементов объекта. При этом выбор размера пикселя, основанный на критерии разрешения Рэля, т. е. в 4 меньший, чем размер, требуемый исходя из пространственно-частотного анализа дискретной голограммы, уже позволяет добиться увеличения глубины резкости при увеличении ширины элементов структуры объекта.

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных численных экспериментов установлена существенная зависимость глубины резкости синтезированных голограмм от параметров дискретизации объекта. Установлено, что использование при синтезе голограммы максимально допустимого исходя из частотно-пространственного анализа дискретной голограммы размера пикселя объекта приводит к обратной, по сравнению с традиционной для оптических систем, зависимости глубины резкости синтезированной голограммы от размера элемента структуры объекта.

### Список источников

- [1] **Корешев, С. Н.** Влияние дискретности цифровых и синтезированных голограмм на их изображающие свойства / С. Н. Корешев, О. В. Никаноров, Д. С. Смородинов // Компьютерная оптика. — 2016. — Том 40. — 6. — С. 793–801.
- [2] **Корешев, С. Н.** Изображающие свойства дискретных голограмм. I. Влияние дискретности голограмм на восстановленное изображение / С. Н. Корешев, О. В. Никаноров, Д. С. Смородинов // Оптический журнал. — 2014. — Том 81. — № 3. — С. 14–19.
- [3] **Корешев, С. Н.** Влияние метода представления объекта на изображающие свойства синтезированных голограмм / С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов, О. В. Никаноров // Оптический журнал. — 2015. — Том 82. — № 4. — С. 66–73.
- [4] **Франсон, М.** Оптика спеклов / М. Франсон — М.: Мир, 1980. — С. 172.
- [5] **Цуканова, Г. И.** Прикладная оптика. Часть 2. / Г. И. Цуканова, Г. В. Карпова, О. В. Багдасарова, В. Г. Карпов, Е. В. Кривоустова, К. В. Ежова под ред. профессора А. А. Шехонина // Учебно-методическое пособие. — СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2003. — С. 32.
- [6] **Корешев, С. Н.** Метод синтеза голограмм-проекторов, основанный на разбиении структуры объекта на типовые элементы, и программный комплекс для его реализации / С. Н. Корешев, А. Д. Громов, О. В. Никаноров // Оптический журнал. — 2012. — Том 79. — № 12. — С. 30–37.

## The influence of computer generated holograms discreteness on the depth of their reconstructed field

*S. N. Koreshev, M. A. Frolova*

Saint-Petersburg national research University of information technologies, mechanics and optics, Saint-Petersburg, Russia

The influence of the object sampling parameters on the dependence of reconstructed is studied for computer generated holograms by the method of mathematical modeling. The main attention is done on the depth of field dependence from the width of the object structure elements. It was found that when the hologram synthesis based on the maximum pixel size of object allowable from frequency-space analysis of discrete hologram it leads to the opposite, compared to traditional optical systems, depth of field dependence from the size of the object structure element. Recommendations on the choice of parameters of object sampling, providing a traditional optical systems behavior of the depth of field are done.

**Keywords:** Computer generated holograms, depth of field, reconstructed image, object sampling, width of the object structure elements, dependence of the depth of field from the sampling parameters.

### 3.6. ЛИППС на объемных образцах и тонких пленках металлов: формирование, постобработка и возможные применения в качестве дифракционных микрорешеток

*А. В. Достовалов, В. П. Корольков, С. А. Бабин*

Институт автоматки и электротметрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия  
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В работе приводятся результаты формирования высокоупорядоченных лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на тонких пленках металлов (титана, хрома) с помощью сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения. Обсуждаются возможные их применения, в том числе для задач защиты продукции.

**Ключевые слова:** Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры, ЛИППС, Фемтосекундные лазерные импульсы, Тонкие пленки металлов, Дифракционные микро-решетки.

#### Введение

Лазерная микрообработка металлов интенсивно развивается в последнее десятилетие для задач изменения топографии и свойств их поверхности. С практической точки зрения для большинства применений требуется экономичная технология модификации поверхности на большой площади. Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) с характерным периодом значительно меньше размера пятна фокусировки пучка может оказаться полезным для данной задачи, поскольку в основе формирования ЛИППС лежит механизм самоорганизации. Формирование абляционных лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (АЛИППС) на металлах под действием поляризованного фемтосекундного лазерного излучения активно исследуется, начиная с середины 2000-х [1–3]. Возможность формирования существенно более упорядоченных термохимических лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ТЛИППС) из оксида на поверхности пленки титана была обнаружена относительно недавно [4–6]. Причина такого позднего обнаружения связана с тем, что ранее исследовалось воздействие на объемные образцы или фольги, а ТЛИППС образуются в чистом виде без абляции только на тонких пленках. Это связано, по всей видимости, с теплоотводом из зоны облучения вглубь массивного образца, сглаживающего модуляцию температуры, возникающую по экстремумам интенсивности в интерференционной картине [5]. На толстых фольгах выявлялось только оксидное оконтуривание АЛИППС, вызванное повышением температуры вокруг зоны облучения фемтосекундным пучком за счет теплоотвода [7]. ТЛИППС формируются существенно более упорядоченными, чем АЛИППС без образования наночастиц, возникающих из-за переосаждения продуктов абляции. Кроме титана эффект формирования ТЛИППС наблюдается также на пленках хрома и никрома (80/20), а на пленках чистого никеля, популярного в исследованиях по формированию АЛИППС высокоупорядоченные оксидные решетки не формируются [8].

Целью настоящей работы является исследование режимов формирования и постобработки ТЛИППС на

пленках хрома и возможных применений их в качестве дифракционных микрорешеток, то есть решеток, сохраняющих упорядоченность на относительно небольшом масштабе порядка десятков и сотен микрометров. Для абляционных ЛИППС порядок сохраняется только на масштабе порядка нескольких микрометров. В работе также приводятся результаты исследования жидкостного травления пленки хрома через маску, образованную оксидной решеткой ТЛИППС. Этот процесс может быть полезен для некоторых приложений. Пленки хрома выбраны в связи с тем, что имеют хорошую адгезию к стеклу и широко распространены в технологиях формирования микроструктур различного назначения и как защитный слой.

#### 1. Формирование ТЛИППС

Эксперименты по созданию ТЛИППС на поверхности пленок хрома выполнялись на установке прецизионной фемтосекундной модификации материалов [6], использующей излучение фемтосекундного лазера Light Conversion PHAROS 6W (длина волны 1026 нм, частота повторения импульсов в экспериментах 200 кГц, длительность импульса на полувысоте 232 фс). Излучение лазера фокусировалось в пятно диаметром 8–17 мкм. Перемещение образца производилось с помощью системы высокоточных координатных столов Aerotech ABL1000. Направление поляризации во время записи изменялось поворотом пластинки  $\lambda/2$ . Энергия импульсов изменялась в диапазоне 30–120 нДж. Скорость перемещения образцов в экспериментах составила 1–45 мкм/с, СЭМ изображения ТЛИППС были получены с помощью СЭМ Hitachi TM3000. Образцы пленок хрома на поверхности стеклянных подложек были получены по технологии вакуумного магнетронного напыления. Толщина пленок составила от 40 до 300 нм (в следующем параграфе). Для пленок толщиной несколько десятков нанометров происходит сквозное окисление, вносящее дополнительную обратную связь, стабилизирующую процесс формирования высокоупорядоченных решеток.

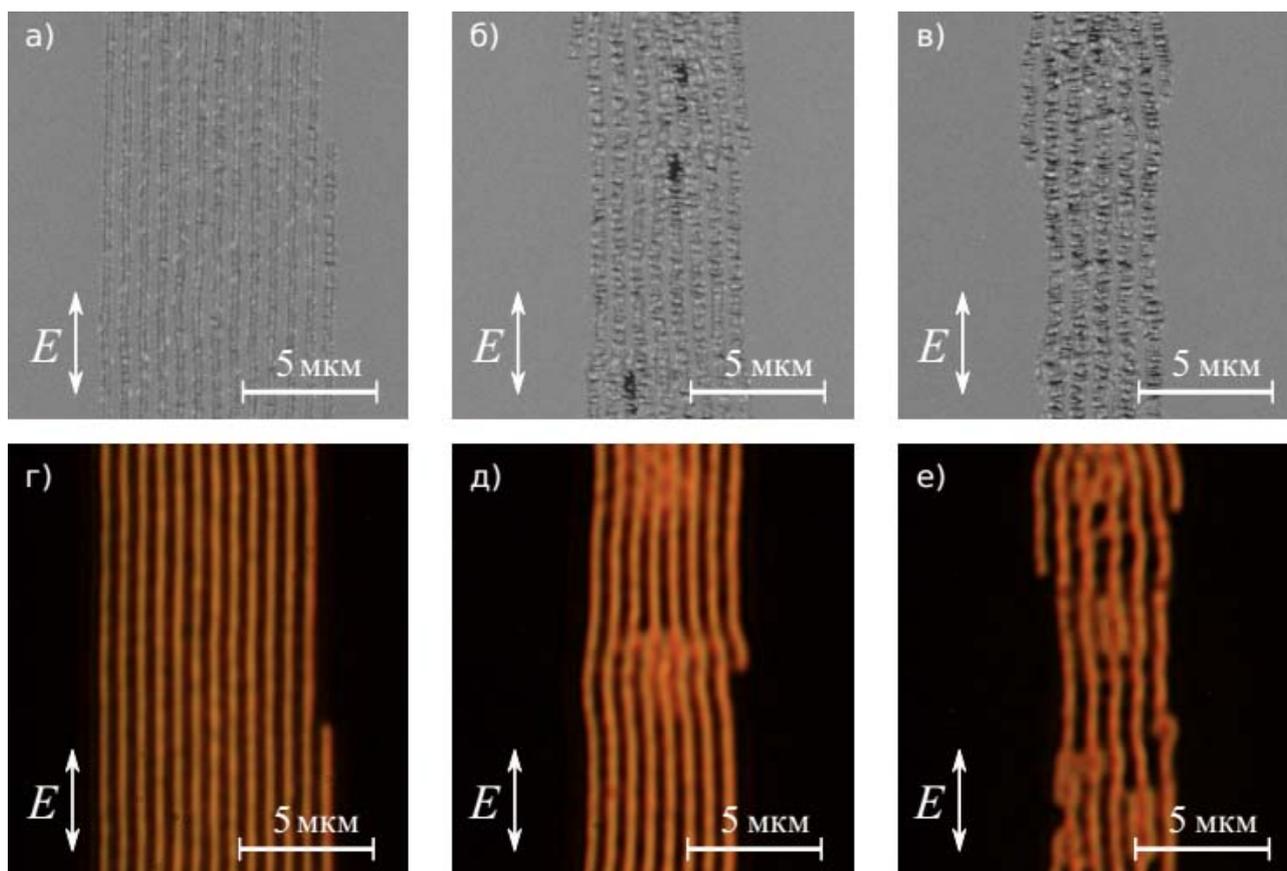


Рис. 1. Изображения ТЛИППС, сформированных на 40 нм пленке хрома при  $E = 10$  нДж,  $V = 1$  мкм/с (а, г), 16 мкм/с (б, д) и 45 мкм/с (в, е)

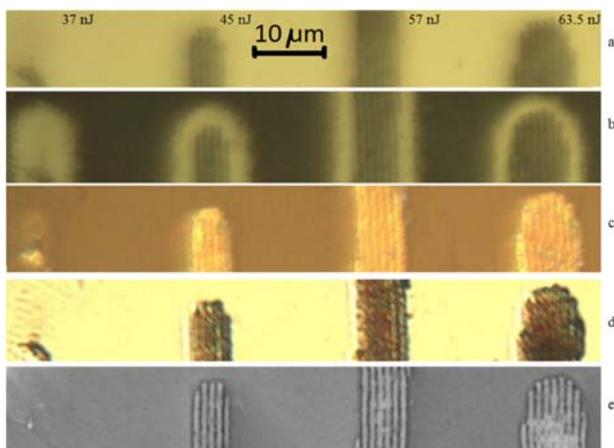
На рисунке 1 представлены изображения сформированных ТЛИППС на пленке хрома, полученные с помощью СЭМ (рисунок 1, а–в) и с помощью оптического микроскопа (рисунок 1 г–е). Измеренный период ТЛИППС увеличивается с 690 нм при  $V = 1$  мкм/с до 720 нм при  $V = 16$  мкм/с и достигает 860 нм при  $V = 45$  мкм/с. Упорядоченность структуры уменьшается при больших скоростях сканирования, и в то же время наблюдается формирование абляционных структур с ориентацией перпендикулярно поляризации падающего излучения. Оксидные области ТЛИППС прозрачны для видимого света, поэтому они наблюдаются в проходящем свете на оптическом микроскопе (рисунок 1, г–е).

## 2. Постобработка ТЛИППС

В настоящей работе мы исследуем возможность переноса топологии ТЛИППС в металлический подслоя, на котором они сформированы фемтосекундным лазерным пучком с помощью жидкостного травления металла через маску оксидной решетки. Наш подход основан на опубликованных ранее данных о селективном жидкостном травлении металлов через маски из их оксидов. Для жидкостного травления топологии хромовых фотошаблонов в термохимической технологии лазерной записи на пленках хрома используется маска из оксида хрома толщиной порядка 5–10 нм, формиру-

емая локальным нагревом, сфокусированным непрерывным [9] или импульсным лазерным излучением [10]. Для селективного травления используется травитель, содержащий 6 частей 25 % водного раствора  $K_3Fe(CN)_6$  и одну часть 25 %-го водного раствора NaOH. Типичное время влажного травления для полного удаления пленки Cr (толщина порядка 60–80 нм) находится в пределах 3–5 минут. По аналогии с этой технологией мы исследовали возможность выборочного жидкостного травления ТЛИППС, сформированных на хромовой пленке толщиной 300 нм. Травлению подвергались структуры, образованные при энергии фемтосекундных импульсов в диапазоне 37–63,5 нДж и диаметре пучка 8,5 мкм. Микроизображение ТЛИППС до травления показано на рисунке 2а. Оно сделано на отражении с помощью оптического микроскопа Zeiss AxioImager с объективом 100 $\times$ . При энергии 37 нДж периодическая структура не формируется. На поверхности пленки Cr имеется лишь слабо видимая (из-за очень тонкого оксидного слоя) широкая дорожка тонкого оксидного слоя.

Процесс травления проводился в 2 стадии. Первая стадия проводилась в течение 1 минут в стандартном фотолитографическом травителе хрома на основе сульфата церия, который намного менее селективен по отношению к оксиду хрома, чем раствор на основе  $K_3Fe(CN)_6$ . Эта стадия была необходима для удаления



а — до травления ТЛИППС (изображение на отражение), б — 7 минут в основном травителе (изображение в отражении), с — 15 минут в основном травлении (в отражении, DIC), d — 32 минуты в основном травителе (на пропускание), e — изображение SEM через 32 минуты в основном травителе.

Рис. 2. Микроизображения структур, сформированных на пленке Cr путем сканирования fs пучка при изменении энергии импульса

тонкой оксидной пленки, которая также находится между гребнями ТЛИППС из-за тепловой диффузии. Второй этап проводился в течение длительного времени в основном селективном травителе. Разрывы в травлении были сделаны для получения микрофотографий структуры поверхности. На рисунке 2b показано микроизображение на отражение после полного удаления неэкспонированной пленки Cr через 7 минут травления в основном травителе. Трек без ТЛИППС, записанный при 37 нДж, хорошо виден. На этом же рисунке показано, что ТЛИППС окружен контуром обычного термохимического оксида шириной около 3 мкм. Первый трек, записанный при 37 нДж, и окисленный контур вокруг ТЛИППС практически исчезают в течение 15 минут после травления (рисунок 2c). ТЛИППС практически не изменяется, по крайней мере, до 32 минут травления. Это означает, что в оксидной зоне имеются глубоко окисленные зоны под выступами ТЛИППС вглубь металлической пленки. SEM-изображение (рисунок 2e) показывает, что штрихи решетки с периодом 930 нм довольно четко разделены при энергиях 45–57 нДж. Формирование такой структуры на хромовой пленке толщиной нескольких сотен нанометров при использовании классической фотолитографии было бы весьма затруднительным из-за изотропности травления через маску фоторезиста. Используемая толщина пленки 300 нм показывает предельные возможности. С существенно более низкой энергией импульсов можно после жидкостного травления формировать оксидные дифракционные решетки с глубиной рельефа 120–150 нм, обеспечивающей высокую дифракционную эффективность на отражение, что может найти применение для защитных структур типа dot-matrix.

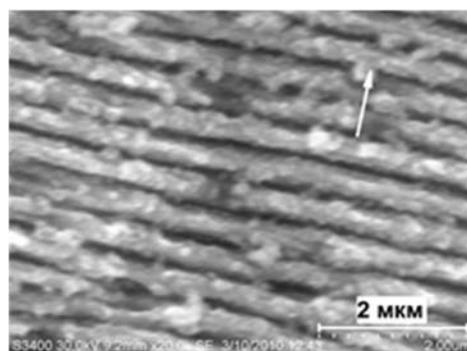


Рис. 3. Фрагмент решетки на фольге Ni—Cu [111]. Стрелка показывает направление поляризации

#### 4. Применения в качестве дифракционных микрорешеток

Использование ЛИППС на металлах как дифракционных структур описано в нескольких работах. В работе [11] изучено воздействие мощного фемтосекундного лазерного излучения на двухслойные гальванически выращенные Ni—Cu фольги. Исследованы наноструктуры, образованные при различных лазерных параметрах и внешних условиях. Установлено, что при облучении в воздухе эти наноструктуры имеют вид квазипериодических бороздок с характерными периодами порядка 400–450 нм при длине волны излучения 744 нм (рисунок 3). Также, в работе впервые обсуждена и экспериментально апробирована возможность применения субволновых дифракционных решеток ЛИППС для создания антиотражающих покрытий на поверхности полимерных реплик, снятых с металлической поверхности, покрытой ЛИППС.

В работе [12] экспериментально исследовано формирование двумерных матриц субволновых точечных структур, непосредственно генерируемых на поверхности объемных образцов молибдена путем фокусировки линзой фемтосекундных лазерных импульсов с двумя длинами волн (800 и 400 нм). Показано, что в отличие от традиционных подходов к изготовлению dot-matrix структур пространственные периодичности таких поверхностных структур зависят от временной задержки между двумя лазерными импульсами через переходную корреляцию между их сверхбыстрыми динамическими процессами, несмотря на их разные длины волн и поляризации. Ориентации решеток могут быть настроены эффективно с помощью изменения поляризации лазерного излучения.

В работе [13] было продемонстрировано динамическое управление поляризацией для задач сложного поверхностного микро- и наноструктурирования в реальном времени с короткой импульсной пикосекундной лазерной обработкой и устройствами пространственной световой модуляции. Этот метод позволяет наноструктурировать большую площадь микро- и наноструктур на промышленном уровне. Получаемая дифракционная окраска поверхности металла с контролируемой структурой ЛИППС может быть применена

для защитной маркировки компонентов с высокой стоимостью.

В патенте компании Renishaw [14] описано использование ЛИППС как дифракционных решеток в измерительной шкале для заполнения штрихов шкалы.

Все описанные в данном параграфе работы объединяет использование записи ЛИППС на объемных образцах металлов. С нашей точки зрения большим потенциалом для создания защитной маркировки имеют ТЛИПСС, сформированные на пленках хрома или титана толщиной менее 50 нм. Без жидкостного травления они позволяют формировать механически прочные амплитудно-фазовые структуры с периодом менее 1 мкм. На данном этапе развития микротехнологий подобные структуры возможно сделать, например, методом электронной литографии, что совершенно исключено для применения к каждому защищаемому изделию в силу высокой стоимости процесса, жесткими требованиями на плоскостность и геометрию образца,

а также необходимостью наносить тонкий слой резиста. Глубина фокуса при фемтосекундном формировании ЛИППС достигает десятков микрометров. Проблема низкой скорости сканирования частично решается мультипликацией сфокусированных пучков.

### Заключение

Приведены результаты формирования высокоупорядоченных лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на тонких пленках металлов (титана, хрома) с помощью сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения. Обсуждены возможные их применения, в том числе для задач защиты продукции по технологии сходной с dot-matrix, но без интерференции двух или более пучков.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-32-60096.

### Список источников

- [1] Vorobyev, A. Y. / A. Y. Vorobyev, C. Guo // Phys. Rev. B. — 2005. — Vol. 72. — 195422.
- [2] Huang, Y. Two-dimensional periodic structure induced by single-beam femtosecond laser pulses irradiating titanium / Y. Huang, S. Liu, W. Li, Y. Liu, W. Yang // Optics Express. — 2009. — Vol. 17. — P. 20756–20761.
- [3] Korolkov, V. P. Surface nanostructuring of Ni/Cu foils by femtosecond laser pulses / V. P. Korolkov, A. A. Ionin, S. I. Kudryashov, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn, R. V. Samsonov, A. I. Maslii, A. Z. Medvedev, B. G. Gol'denberg, // Kvantovaya electronica. — 2011. — Vol. 41. — № 4. — P. 387–392.
- [4] Öktem, B. Femtosecond Laser-Induced TiO<sub>2</sub> Nanostructures on Titanium / B. Oktem, H. Kalaycioglu, F. Ö. Ilday // Conference on Lasers and Electro-Optics — 2010. — P. CMR4.
- [5] Öktem, B. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses / B. Öktem, I. Pavlov, S. Ilday, H. Kalaycioglu, A. Rybak, S. Yavaş, M. Erdoğan, F. Ö. Ilday // Nature Photonics. — 2013. — Vol. 7. — № 11. — P. 897–901.
- [6] Dostovalov, A. V. Simultaneous formation of ablative and thermochemical laser-induced periodic surface structures on Ti film at femtosecond irradiation / A. V. Dostovalov, V. P. Korolkov, S. A. Babin // Laser Physics Letters. — 2015. — Vol. 12. — № 3. — P. 036101. — 6 p.
- [7] Dostovalov, A. V. Specific features of formation of self-induced gratings on metal foils during scanning by a tightly focused femtosecond laser beam / A. V. Dostovalov, V. P. Korolkov, S. K. Golubtsov, V. I. Kondrat'ev // Quantum Electronics. — 2014. — Vol. 44 — № 4. — P. 330–334.
- [8] Dostovalov, A. V. Study of TLIPSS formation on different metals and alloys and their selective etching / A. V. Dostovalov, V. P. Korolkov, V. S. Terentiev, et al. // Proceedings of SPIE: Laser-based Micro- and Nanoprocessing XI. — 2017. — Vol. 10092. — P. 100921H.
- [9] Cherkashin, V. V. Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films / V. V. Cherkashin, E. G. Churin, V. P. Korol'kov, V. P. Koronkevich, A. A. Kharissov, A. G. Poleshchuk, J. H. Burge // Proceedings of SPIE. — 1997. — Vol. 3010. — P. 168–179.
- [10] Veiko, V. P. Laser thermochemical writing: pursuing the resolution / V. P. Veiko, E. A. Shakhno, D. A. Sinev // Optical and Quantum Electronics. — 2016. — Vol. 48. — № 6. — P. 322. — DOI: 10.1007/s11082-016-0594-y.
- [11] Корольков, В. П. Фемтосекундное лазерное наноструктурирование поверхности Ni/Cu-фольг / В. П. Корольков, А. А. Ионин, С. И. Кудряшов, Л. В. Селезнев, Д. В. Синецын, Р. В. Самсонов, А. И. Маслий, А. Ж. Медведев, Б. Г. Гольденберг // Квантовая электроника. — 2011. — Том 41. — № 4. — С. 387–392.
- [12] Cong, J. Fabricating subwavelength dot-matrix surface structures of molybdenum by transient correlated actions of two-color femtosecond laser beams / J. Cong, J. Yang, B. Zhao, X. Xu // Optics Express. — 2015. — Vol. 23. — № 4. — P. 5357–5467.
- [13] Yanga, J. Advanced laser patterning for security marking of high value metal components / J. Yanga, L. Pabstb, W. Perriera, O. Allegrec, G. Deardena, S. P. Edwardsona // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 183. — P. 363–368.
- [14] Патент № 2014 III 697 AI WO. Measurement scale / M. D. Kidd, N. J. Weston, J. R. Henshaw, M. Ardron, J. Dardis, R. Thomson. — Оpubл. 04.07.2014.

## **LIPSS on bulk samples and thin films of metals: formation, post-processing and possible applications as diffraction micro-gratings**

*A. V. Dostovalov, V. P. Korolkov, S. A. Babin*

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia  
Novosibirsk state university, Novosibirsk, Russia

The results of the formation of highly-ordered laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on thin metal films (chromium) with the help of focused femtosecond laser radiation are presented. Their possible applications including for tamper-proof markings are discussed.

**Keywords:** Laser-induced periodic surface structure, LIPSS, Femtosecond laser pulses, Metal thin films, Diffractive micro-grating.

### 3.7. Дифракционно-рефракционные хрусталики глаза с расширенной фокальной областью

Г. А. Ленкова

Институт автоматки и электротрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Рассмотрены особенности форм поверхностных структур мультифокальных искусственных хрусталиков глаза (интраокулярных линз ИОЛ). В отличие от бифокальных дифракционно-рефракционных ИОЛ мультифокальные позволяют хорошо видеть не только вблизи и вдаль, но и на промежуточном расстоянии. Расширение области чёткого зрения достигается на основе явлений дифракции, интерференции и рефракции: формируются дополнительные фокусы или просто увеличивается протяжённость глубины фокуса. Приведены оптические характеристики наиболее известных мультифокальных ИОЛ (трифокальных, квадрофокальных и с расширенной фокальной областью) и данные фирм-производителей.

**Ключевые слова:** Дифракционно-рефракционный хрусталик глаза, Мультифокальная, трифокальная, Квадрофокальная интраокулярная линза, Расширение фокальной области.

#### Введение

До недавнего времени дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы ИОЛ (искусственные хрусталики глаза) были бифокальными линзами, которые используют базовую кривизну линзы и нулевой и первый порядки дифракции для одновременного формирования дальнего и ближнего фокусов [1]. При клиническом исследовании пациенты, которым имплантировали такие ИОЛ, имели хорошую остроту зрения вдаль и вблизи, но на промежуточном расстоянии острота зрения значительно снижалась. Чтобы решить эту проблему, были предложены разнообразные формы профилей оптической поверхности ИОЛ, позволяющие сформировать дополнительные (промежуточные) фокусы.

В настоящее время существует много различных решений и воплощений мультифокальных ИОЛ, в том числе трифокальных, квадрофокальных и с расширенной фокальной областью. Результаты лабораторных испытаний и имплантаций обычно подробно обсуждаются, но оптические конструкции ИОЛ не всегда понятны, даже если есть ссылки на патенты.

Цель работы — анализ особенностей дифракционно-рефракционных поверхностных структур, применяемых в современных мультифокальных ИОЛ с более чем двумя оптическими силами; рассмотрение оптических характеристик наиболее известных мультифокальных ИОЛ с указанием фирм-изготовителей.

#### 1. Оптические структуры дифракционных элементов ИОЛ

Формы профилей дифракционных структур известных дифракционно-рефракционных мультифокальных ИОЛ отличаются большим разнообразием. Большинство из них основаны на бинарной и киноформной структурах или на комбинировании этих структур. На рисунке 1 показаны наиболее характерные формы фазовых профилей структур: 1 — бинарный, 2 — двойной пилообразный, 3 — пилообразный, 4 — пилообразный с удвоенной частотой штрихов, 5 и 6 — с наложением и с чередованием пилообразных профилей, 7 — комбинированный, 8 — эшелонный, 9 — с постоянной шириной зон (в 9 линейная зависимость от  $r$ ), 10 — квадрофокальный вырожденный,

т. к. действует как трифокальный.  $h$  — высота структуры,  $r^2$  — квадрат радиуса диафрагмы (зрачка).

Бинарный профиль (1 на рисунке 1) позволяет разделить световой пучок, падающий на ИОЛ, на три дифракционных порядка ( $-1$ -й,  $0$ -й и  $+1$ -й фокусы, рисунок 2). Но в  $-1$ -м порядке увеличиваются хроматические aberrации [2]. Этот недостаток также присущ структурам с профилем 2 и близким к нему синусоидальным. Возможно из-за хроматических aberrаций трифокальные структуры с  $-1$ -м порядком не нашли широкого распространения в конструкциях мультифокальных ИОЛ.

В отличие от  $-1$ -го в  $+1$ -м порядке в ИОЛ с бинарной и пилообразной структурой (3 и 4 на рисунке 1) хроматические aberrации компенсируются благодаря удачному сочетанию низкой и высокой оптических сил дифракционного и рефракционного элементов и противоположной зависимости aberrаций этих элементов от длины волны.

Пилообразный профиль (рисунок 3) формирует только два интенсивных порядка дифракции ( $0$ -й и  $+1$ -й), поэтому для получения трифокальных ИОЛ

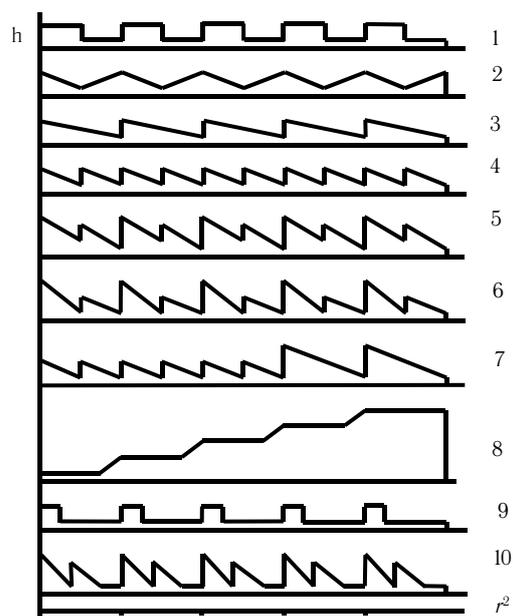


Рис. 1.

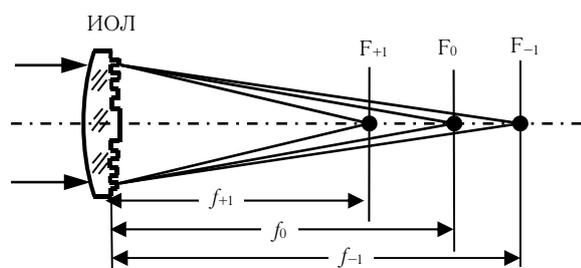


Рис. 2.

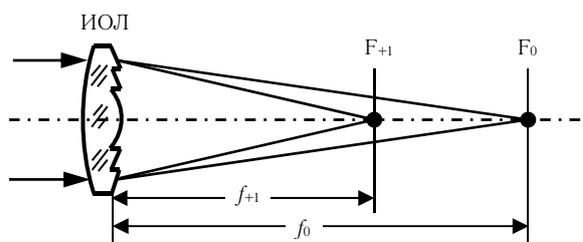


Рис. 3

комбинируют два профиля путём их наложения или чередования (5 и 6 на рисунке 1) [3]. В профиле 5 профиль 3 с более низкой частотой зон создаёт промежуточный фокус, а профиль 4 с удвоенной частотой — дальний и ближний фокусы. В профиле 6 частота зон налагаемых профилей одинаковая, но разная высота. Высоты профилей подбираются в зависимости от требуемого соотношения интенсивностей в фокусах и их взаимного расположения. В некоторых конструкциях ИОЛ вводится аподизация, заключающаяся в том, что высота профиля изменяется в пределах диаметра линзы, например, уменьшается к периферии. При этом распределение интенсивности варьируется или увеличивается в дальнем фокусе.

Из-за проблем, возникающих при алмазном точении ИОЛ и матриц, комбинируют профили. Например, в центральной части бифокальная (фазовая высота —  $\lambda/2$ ,  $\lambda$  — длина волны), а на периферии монофокальная (несколько  $\lambda$ , 7 на рисунке 2) структура. Или в центральной части трифокальная, а на периферии бифокальная структура. Это позволяет расширить зоны в краевых частях линзы, что облегчает изготовление, но при этом возникает зависимость распределения интенсивности в порядках дифракции от децентрализации ИОЛ внутри глаза.

Для избавления от резких поверхностных изменений (крутых скатов, острых вершин), вызывающих рассеяние света, предлагается изменять рельеф (кривизну) поверхности линзы, наращивая его на высоту ступенями, соответствующими фазовой задержке в  $\lambda/2$  или  $\lambda$ , подобно эшелону Майкельсона (8 на рисунке 2) [4]. Особенность структуры в том, что не вносятся хроматические aberrации. Возможно сочетание разных частот и высот ступеней. Эшелонную мультифокальную ИОЛ скорее можно назвать сфазированной рефракционной, чем дифракционной. В некоторых ИОЛ сочетаются дифракционные и рефракционные способы расширения фокальной области: центральная часть одной из поверхностей ИОЛ — рефракционная прогрессивная (средний и дальний фокусы), средняя — бинарная дифракционная, крайняя — рефракционная монофокальная [5]. Иногда увеличивают глубину фокуса за счёт уменьшения оптической силы дифракционного компонента [6]. О структуре некоторых промышленных мультифокальных ИОЛ можно только догадываться, так как они, вероятно представляют ноу-

хау фирм и подробно не раскрываются даже при наличии патентов.

Иногда дополнительные оптические фазовые элементы (кольцевые решётки без оптической силы) выполняют в ИОЛ роль только просто расширителя фокальной области, присущей самой рефракционной части ИОЛ и самого глаза полностью. Эти решётки могут иметь вид 1 на рисунке 1, но с линейной, а не квадратичной зависимостью от радиуса зоны. Расстояние между зонами постоянное, как в дифракционном аксиконе. Подобное решение используется в новой технологии EDOF (extended depth of focus) [7]. На поверхности линзы гравированы оптический элемент в виде концентрических канавок глубиной менее 1 мкм и скважностью  $1/3-1/4$  (9 на рисунке 1). Создаётся расширенный фокус длиной 1 мм (соответствует 3 дптр). На основе этой технологии сделаны очки, которые выпускает фирма Xceed Imaging (Израиль), но автор считает, что идея подходит и для интраокулярных линз.

## 2. Характеристики мультифокальных ИОЛ

В таблице приводятся названия мультифокальных ИОЛ и фирм изготовителей (в скобках), а также те их характеристик, которые имеются в опубликованной литературе.  $d_1$  и  $S_1$  — диаметр и площадь центральной зоны дифракционного элемента,  $d$  — диаметр структуры,  $n$  — показатель преломления материала ИОЛ,  $h$  — высота структуры,  $D$  — оптическая сила дифракционной структуры в дптр (в скобках указано расстояние от глаза до предмета в см).

Все мультифокальные ИОЛ, представленные в таблице, можно разделить на три группы по принципу увеличения глубины фокуса. Первая группа конструируется по чисто дифракционному принципу, когда одна из поверхностей имеет одну или две дополнительные оптические силы. Это трифокальные линзы: MIOL-Record, FineVision, Acriva Reviol Tri-ED и AcrySof® IQ PanOptix. В последней линзе quadroфокальный профиль (10 на рисунке 1). Во второй группе комбинируются рефракционный и дифракционный принципы. Это бифокальная линза с расширенным фокусом OptiVis и трифокальная эшелонная AT LISA tri 839MP. В третьей группе глубина фокуса расширяется за счёт применения дифракционных элементов с низкой оптической силой (TECNIS® Symfony, но до диаметра зрачка 2 мм, т. к. далее проявляет себя как бифокальная линза) и оригинальных методов, основанных на

Таблица 1.

Название ИОЛ, характеристики	$d_1, S_1, h, D$	Соотношение интенсивностей вдаль/вблизи/ среднее, потери	Структура, форма поверхности
1. MIOL-Record (НПП «Репер-НН», 2007–2010 гг.), гидрофобная, $n = 1,55$	$d_1 = 0,860$ мм, ( $S_1 = 0,58$ мм <sup>2</sup> ), $h = 1,1$ мкм, $-2, 0, +2$ дптр	28/28/28 %, 16 %, ( $d = 3,4$ мм)	$d = 3,4$ мм — трифокальная, далее до $d = 6$ мм — рефракционная
2. FineVision (Physiol, 2010 г.), гидрофильная, $n = 1,46$ , гидрофобная, $n = 1,52$	23 зоны, $+1,75$ , $+3,50$ дптр	49/34/17 %, 15 % ( $d = 3$ мм), 67/24/9 %, 15 % ( $d = 4,5$ мм)	трифокальная, аподизированная, асферическая, слабое гало
3. OptiVis, (Aaren Scientific, Carl Zeiss Meditec, 2011 г.), расширенная глубина фокуса	$S_1 = 2,1$ мм <sup>2</sup> ( $r_1 = 0,81$ мм), $+2,8$ дптр	41/59/16 %, 4 % ( $d = 3$ мм)	$d = 1,5$ мм — рефракционная прогрессивная (вдаль и среднее), далее до $d = 3,8$ мм — бифокальная аподизированная, далее до $d = 6$ мм — рефракционная
4. AT LISA tri 839 MP (Acri.Tec GmbH, Carl Zeiss Meditec) (2012 г.), гидрофильная с гидрофобным покрытием	$S_1 = 1,3$ мм <sup>2</sup> , ( $r_1 = 0,64$ мм), $+1,66$ дптр (80 см), $+3,33$ дптр (40 см)	50/30/20 %, 14,3 % ( $d = 4,34$ мм)	$d = 4,34$ мм — трифокальная эшелонная, далее до $d = 6$ мм — бифокальная, асферическая ( $-0,18$ мкм), заметное гало.
5. Acriva Reviol Tri-ED (VSY Biotechnology, 2015 г.), гидрофильная	25 зон, $+1,5$ , $+3$ дптр	44/28/28 %, 10,9 % ( $d = 6$ мм), мало зависит от диаметра	трифокальная, асферическая передняя поверхность, расширенная глубина фокуса
6. AcrySof® IQ PanOptix, Model TFNT00 (Alcon Surgical Inc., Novartis, 2015 г.), гидрофобная	15 зон, ( $d = 4,5$ мм), $+2,17$ дптр (60 см), $+3,25$ дптр (42 см)	50/25/25 %, 18 % ( $d = 4,5$ мм)	$d = 4,5$ мм — квадрофокальная, трифокальная, далее до $d = 6$ мм — монофокальная дифракционная
7. TECNIS® Symphony Model ZXR00, (AMO, Johnson & Johnson, 2015 г.), гидрофобная, $n = 1,47$ .	$S_1 = 1,3$ мм <sup>2</sup> , ( $r_1 = 0,64$ мм) 9 зон, $+1,75$ дптр	14,3 % — потери	бифокальная, асферическая, расширение глубины фокуса на $1,0$ дптр

применении элементов с постоянной шириной зон, аналогичных аксиконам.

### Заключение

Бифокальные дифракционно-рефракционные ИОЛ позволяют пациентам хорошо видеть вдаль и вблизи, но на промежуточном расстоянии острота их зрения значительно снижается. Для преодоления этого недостатка были предложены разнообразные формы профилей оптической поверхности ИОЛ, позволяющие сформировать дополнительные (промежуточные) фокусы.

На основе патентов, информации фирм и публикаций об оптических исследованиях проведен анализ особенностей поверхностных структур современных мультифокальных ИОЛ с более чем двумя оптическими силами. Мультифокальность в виде отдельных фокусов достигается с помощью дифракционных (бифокальных, трифокальных и квадрофокальных), рефракционных прогрессивных (с изменением кривизны

базовой поверхности линзы) и эшелонных (со ступенчатым изменением базовой поверхности линзы) структур. Мультифокальность в виде расширенной фокальной области получают путём уменьшения оптической силы дифракционного элемента и применения бинарных структур низкой частоты, подобных дифракционному аксикону.

Приведены характеристики наиболее известных мультифокальных ИОЛ и данные фирм изготовителей. Каждая фирма заявляет о преимуществах своих моделей ИОЛ. Насколько важны те или другие свойства линз зависит от потребности и возможности пациентов. Усложнение конструкций ИОЛ повышает стоимость изготовления. Возможно, кого-то устроят монофокальные ИОЛ и очки для чтения, а не мультифокальные ИОЛ, которые на порядок дороже. Тем не менее, интерес к бифокальным, трифокальным и другим мультифокальным ИОЛ сохраняется, так как они создают более комфортные условия для зрения.

### Список источников

- [1] Ленкова, Г. А. Дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы / В. П. Корольков, В. П. Коронкевич, Р. К. Насыров, А. С. Гутман, И. А. Исаков, В. М. Треушников // Автометрия. — 2008. — Том 44. — № 4. — С. 75–88.
- [2] Ленкова, Г. А. Хроматические aberrации модели глаза с дифракционно-рефракционными интраокулярными линзами // Автометрия. — 2009. — Том 45. — № 2. — С. 99–114.
- [3] Gatinel, D. Design and qualification of a diffractive trifocal optical profile for intraocular lenses / Ch. Pagnouille, Y. Houbrechts, L. Gobin // J Cataract Refract. Surg. — 2011. — Том 37. — № 11. — P. 2060–2067.
- [4] Патент № 9 223 148 US. Multifocal Lens / W. Fiala, M. Gerlach. — Оpubл. 29.12. 2015.
- [5] Патент № 7 073 906 US. Aspherical diffractive ophthalmic lens / V. Portney, — Оpubл. 11.06. 2006.
- [6] Патент № 8 747 466 US. Intraocular lens having extended depth of focus / H. A. Weeber, P. Piers. — Оpubл. 10.06.2014.
- [7] Патент № 7 061 693 US. Method and system for extended depth of focus / Z. Zalevsky — Оpubл. 13.06.2006.

## **Diffraction-refractive crystalline lenses of eye with an extended focal area**

*G. A. Lenkova*

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The features of the forms of the surface structures of the multifocal artificial lens of the eye (IOL intraocular lenses) are considered. In contrast to bifocal diffraction-refractive IOLs, multifocal allow to see well not only near and far, but also at an intermediate distance. Extending the area of clear vision is achieved on the basis of diffraction, interference and refraction phenomena: additional foci are formed or the length of the focus depth simply increases. Optical characteristics of the most famous multifocal IOLs (trifocal, quadrofocal and with extended focal area) and data of manufacturing companies are presented.

**Keywords:** diffraction-refractive crystalline lenses of eye, multifocal, trifocal, quadrofocal intraocular lens, extending of the focal area.

### 3.8. Психофизическое преобразование плоского изображения в объёмное

*Г. Г. Голенко*

АО «Спэйс Вижн», Москва, Россия

В данной работе проведено обоснование возможности когнитивного преобразования плоского изображения в объёмное. Основанием для такого преобразования является подмеченное ещё Беркли [1] доминирование в зрительной системе когнитивных стимулов (зрительной памяти, жизненного опыта) над сенсорными стимулами, значимость которых для зрения Беркли отрицал (это тот самый Беркли, который вел многолетнюю научную полемику с Ньютоном о целесообразности сокращения в дифференциальных уравнениях бесконечно малых высших порядков). Это относится к зрению вообще. Как показали последующие исследования, Беркли в основном, был прав. Применительно к стереозрению, по современным представлениям, когнитивными зрительными стимулами являются монокулярные признаки удалённости, такие, как линейная перспектива, перекрытие удалённых объектов близлежащими, и т. д., (всего таких признаков около двадцати). Сенсорным стимулом является диспаратность, т. е., угловое расстояние между зрительными направлениями и главными зрительными направлениями. Правота Беркли состоит в том, что довольно часто наблюдается эффект спонтанного, спорадического стереопсиса, когда плоское изображение, содержащее достаточное количество монокулярных признаков удалённости, воспринимается объёмным, но при этом, диспаратность отсутствует по определению.

**Ключевые слова:** Стереопсис, Диспаратность, Объёмное телевидение, Объёмный кинематограф, Зрительное поле, Перцептивный, Спорадический, Эпидемический, Когнитивный, Психофизический.

#### Введение

В основе работы лежат проведенные автором исследования стереопсиса искусственных стереопар, при этом, правый и левый ракурсы получаются из одного исходного плоского изображения посредством горизонтального контрнаправленного сдвига кадровой рамки [2, 3]. Дозированное, в пределах зрительной экологии, привнесение диспаратности в искусственную стереопару превращает процесс возникновения стереопсиса из спорадического в гарантированный, эпидемический.

И всё-таки, почему данный вид стереопсиса носит спорадический характер, а не является глобальным, эпидемическим. Казалось бы, как здорово, открыл книгу — а там все иллюстрации объёмные. Но это не так. Если бы было так, то возникли бы как минимум, два перцептивных конфликта. Первый — это возможная потеря пространственной ориентации, зрителю было бы трудно понять, с какой стороны рамки он находится — «втягивание» в образ. Второй конфликт — это разрыв между тактильными и зрительными ощущениями, что так же может привести к потере ориентации. Поэтому, спонтанный стереопсис наиболее часто наблюдается в обычных кинотеатрах, в картинных галереях, т. е., в тех местах, где имеется достаточное количество подкрепляющих стимулов, позволяющих зрителю адекватно оценивать своё местоположение.

Проведенные исследования позволили разработать систему перцептивного вещательного объёмного телевидения стандартного телевизионного сигнала [4–6], с полным сохранением всех визуальных параметров обычного стандартного ЖК-телевизора (яркость, цветность, четкость, размеры зоны видения). При этом, эффект достигается посредством тонкого линзового растра особого профиля, устанавливаемого на небольшом расстоянии перед экраном телевизора. Поскольку телевизионный сигнал стандартный, то теле-

визор способен перерабатывать в объёмные, изображения всех каналов. Поскольку эффект практически, чисто когнитивный, а следовательно, происходит без рассеивания, качество такого объёмного изображения превосходит качество объёмного изображения любых других объёмных систем, в том числе, и голографических. При этом, перцептивная глубина объёмного изображения сравнима с размером диагонали экрана.

Наблюдался процесс возникновения локальной эпидемии стереопсиса, когда стереопсис возникал на обычных телевизорах, без иницирующих растров, находящихся в одном помещении с объёмным телевизором. Это происходило даже в том случае, когда телевизоры находились вне поля зрения наблюдателя, направленного на объёмный телевизор. Данный факт свидетельствует об устойчивой перестройке зрительной системы световым полем объёмного телевизора. Поскольку данное воздействие находится в пределах естественного зрительного поля, то в отсутствие подкрепляющих стимулов, стереопсис естественным образом пропадает, и не нарушает равновесие зрительной системы.

Конструктивно, преобразующий растр может быть выполнен в двух вариантах: если телевизор новый, то растр может быть встроен в корпус в заводских условиях; если телевизор уже находится в эксплуатации, то растр может крепиться к телевизору посредством простого банджа. Себестоимость объёмного телевизора будет мало отличаться от себестоимости обычного телевизора с тем же размером диагонали экрана.

На описанных выше принципах, в процессе разработки, находится система перцептивного моноркурсного объёмного кинематографа. Такая система предполагает проводить киносъёмку обычной камерой с одного ракурса и вести проекцию с обычного однообъективного поста. В зальное пространство диспаратность привносится посредством киноэкрана стандартного размера особого профиля. Здесь необходимо отметить, что в России имеется опыт изготовления

растровых кино экранов театральных размеров. Впервые такой экран был разработан С. Ивановым и А. Андриевским в 1942 году, а в 1947 году в кинотеатре «Москва» началась демонстрация полнометражных стереофильмов. При реализации на практике монокурсного объемного кинематографа, то в принципе, в объеме можно посмотреть даже первые (1895 г.) фильмы братьев Люмьер.

#### Список источников

- [1] **Голенко, Г. Г.** Становление представлений о зрении и стереопсисе // Запись и воспроизведение объемных изображений в кинематографе и других областях: VIII Международная научно-практическая конференция: Москва, 25–26 апреля 2016 г.: Материалы и доклады. — М.: ВГИК, 2016. — С. 278–294.
- [2] **Голенко, Г. Г.** Основы монокурсного объемного вещательного телевидения. Когнитивные технологии // Запись и воспроизведение объемных изображений в кинематографе и других областях: Научно-техническая конференция: Москва, 23–24 апреля 2009 г.: Материалы и доклады. — М.: МКБК, 2009. — С. 61–72.
- [3] **Голенко, Г. Г.** Монокурсный стереопсис как ощущение объема при наблюдении плоских изображений // Мир техники кино. — 2006. — № 2. — С. 14–21.
- [4] **Патент № 2 224 273 РФ.** Устройство Голенко для получения объемного изображения объектов / Г. Г. Голенко. — Оpubл. 20.02.2004, Бюл. № 5.
- [5] **Патент № 2 224 274 РФ.** Устройство Голенко для получения объемного изображения объектов / Г. Г. Голенко. — Оpubл. 20.02.2004, Бюл. № 5.
- [6] **Патент № 2 385 477 РФ.** Оптический трансформатор Голенко для преобразования единого двумерного монокурсного изображения в объемное изображение / Г. Г. Голенко. — Оpubл. 27.03.2010, Бюл. № 9.

### Psychophysical transformation of a flat image into a volumetric

*G. G. Golenko*

Space Vision, Moscow, Russia

Originally, the author has been researching artificial stereo pairs. Stereo pairs were received by Xerox in two copies one original flat angle normal stereo pairs. Copies were located nearby on the same plane. Then, on each copy, frame, the framing was applied and was produced by the *kontrnavlennyj* shift of the framework in the horizontal direction. Perceptually, stereopsis of natural and artificial stereo pairs was similar. Based on the research, was designed and manufactured thin screen special profile which was set near a conventional LCD TVs with screen diagonal 42", running from the standard television signal. Volume was received television pictures with the screen output comparable to the screen diagonal. All planar image parameters such as sharpness, contrast, saturation, visions and zone size etc., remain unchanged. Since the process of cognitive noise wasn't quality surround image was above the hologram.

**Keywords:** Stereopsis, Binocular Disparity, 3D TV, 3D Cinema, Visual perceptual field, Sporadic, Epidemic, Cognitive, Psycho-Physical.

### 3.9. Индикатор дополненной реальности на основе световодной пластины с пропускающими ДОЭ

Я. А. Град, В. В. Николаев, С. Б. Одинок, А. Б. Соломашенко

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

В статье рассмотрена возможность получения многоцветного изображения с помощью голографического индикатора на основе световодной пластины с дифракционными оптическими элементами (ДОЭ). Определены параметры коллимирующей оптической системы и световодной подложки, а также проведены экспериментальные исследования по получению многоцветного изображения.

**Ключевые слова:** Голографический индикатор, Дополненная реальность, Дифракционная решетка, Дифракционный оптический элемент, Световод.

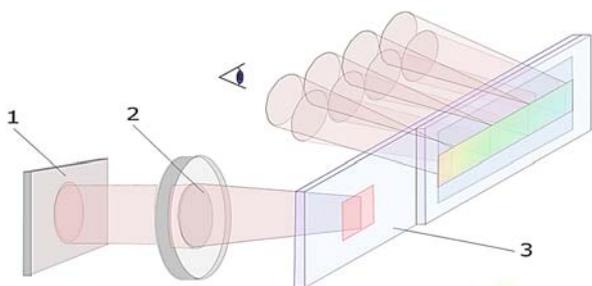
Развитие цифровых и интерактивных мультимедийных технологий, а также новых интерфейсов взаимодействия «человек-система» приводит к стремительному росту популярности устройств дополненной реальности. Подобные устройства находят все большее применение в таких сферах как логистика, связь, авиация, медицина, производство, ремонт и техническое обслуживание и т. п. На данный момент многие компании выпустили на рынок свои устройства дополненной реальности, а именно: Google Glass, Epson Moverio BT-200, Lumus OE-50, HoloLens Microsoft, Q-Sight, Sony SmartEyeglass, TL1 TrueLifeOptics. Часть из таких устройств построена по схеме со светоделятелями или «free-form» поверхностями, а другая часть — на основе световодов с дифракционными оптическими элементами (ДОЭ), которые представляют интерес, т. к. обеспечивают большие размеры выходного зрачка (до 40 мм) без существенного увеличения габаритов коллимирующей оптической системы. В то же время большинство таких устройств на данный момент являются монохромными, что существенно ограничивает сферы их возможного применения.

Существует несколько методов получения цветного изображения с помощью голографических дисплеев на основе световодных пластин и ДОЭ, описанные в [1–3]. При этом на первый план при их разработке и реализации выходит компенсация хроматических aberrаций [4–5], связанных с распространением в световоде излучения R, G, B-компонент под разными углами, в силу различных углов дифракции излучения на входе в световодную подложку. Рассмотрим схему

индикатора дополненной реальности на основе световодной пластины с ДОЭ и возможность получения с его помощью многоцветного изображения.

Схема работы индикатора аналогична [2–3] с пропускающими дифракционными оптическими элементами. Система голографического индикатора, как показано на рисунке 1, включает в себя микродисплей, формирующий необходимое изображение, коллимирующий объектив и световодную пластину с ДОЭ. В общем случае ДОЭ представляют собой дифракционные решетки [1–3], предназначенные для ввода излучения в пластину под углами, превышающими угол полного внутреннего отражения (ПВО), и последующего вывода излучения из нее.

Вводная решетка рассчитана таким образом, чтобы первый порядок дифракции входил в пластинку под углом, превышающим угол ПВО. Попадая на поверхность пластинки с выводной решеткой, часть излучения дифрагирует в идущий в сторону оператора «+1» порядок, а «0» порядок продолжает распространяться по пластинке, подчиняясь закону ПВО. «-2» и «+2» порядками дифракции можно пренебречь в силу крайне малой эффективности дифракционной решетки, а соответственно и энергии этих порядков по сравнению с «+1». Излучение выходит из пластинки под тем же углом, что и входит в нее (т. к. периоды входной и выходной решеток равны), т. е. одновременно выводит весь конус лучей для формирования области выходного зрачка [2]. Таким образом, зона выходного зрачка будет состоять из большого числа перекрываю-



1 — микродисплей; 2 — коллимирующий объектив;  
3 — световодная пластина с ДОЭ

Рис. 1. Схема работы голографического индикатора

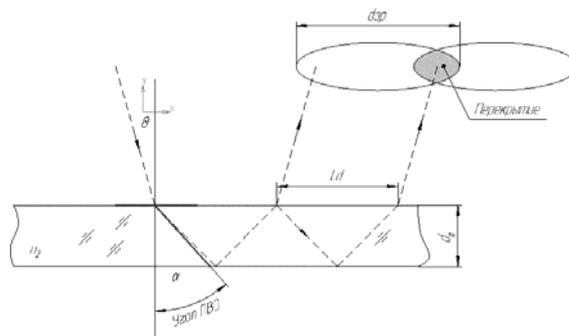


Рис. 2. Схема перекрытия зрачков при выходе излучения из пластины

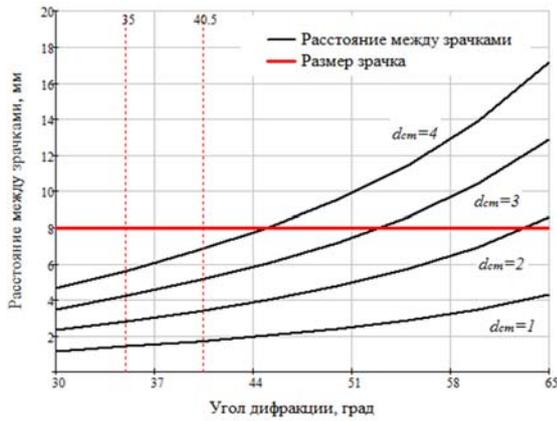


Рис. 3. Зависимость значения  $L$  от различных углов дифракции при различной толщине стеклянной подложки

щихся выходных зрачков проекционной системы, переносимых индикатором в плоскость расположения глаз оператора, как показано на рисунке 1. Дифракционная эффективность вводной решетки должна быть максимальной для минимизации потерь излучения на входе, а выводная решетка должна обладать переменной эффективностью для выравнивания по всему полю зрения яркости отдельных выходных зрачков между собой, как показано на рисунке 1.

При этом для наблюдения «неразрывного» изображения должны быть согласованы параметры световодной пластины (показатель преломления, толщина), коллимирующей оптической системы (диаметр выходного зрачка, рабочее угловое поле) и дифракционных решеток (период). Это необходимо, чтобы в плоскости расположения глаз наблюдателя обеспечить перекрытие отдельных зрачков, выводимых из световодной пластины с помощью решетки, как показано на рисунке 2. В противном будут наблюдаться «слепые зоны», в которых передаваемое изображение будет отсутствовать, что делает такую реализацию не пригодной для использования в составе систем визуализации и дополненной реальности.

В случае многоцветной системы (RGB) это условие должно обеспечиваться для всех трех рабочих длин

волн, т. е. расстояние которое проходит луч каждой длины волны при ПВО вдоль поверхности подложки должно быть меньше диаметра выходного зрачка коллимирующей оптической системы, т. е.  $L \leq \varnothing_{00}$ , [2] где расстояние  $L$  определяется по формуле (1):

$$L = 2d_{ст} \operatorname{tg} \beta, \quad (1)$$

где  $d_{ст}$  — толщина стекла, мм;  $\beta$  — угол дифракции излучения на вводной решетке, град.

Т. к. максимальный угол дифракции, а значит и данное расстояние, соответствует красной длине волны, то расчет имеет смысл вести именно для нее. Кроме того, излучение каждой рабочей длины волны индикатора должно входить в пластину под углом ПВО. В данном случае при выполнении этого условия для синей длины волны, для остальных углов дифракции автоматически превысит угол ПВО в стекле, как это также описано в [4]. Все вышеперечисленные условия накладывают определенные ограничения на основные параметры голографического индикатора (период ДР, показатель преломления стекла, толщина и т. п.), поэтому рассмотрим основные взаимосвязи.

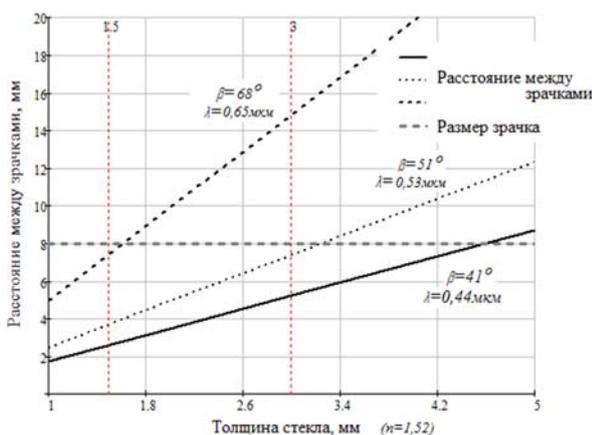
Определим период вводной и выводной решеток по формуле (2):

$$d_p (\sin \alpha_{\max} + n_{ст} \sin \beta_B) = m \lambda_B, \quad (2)$$

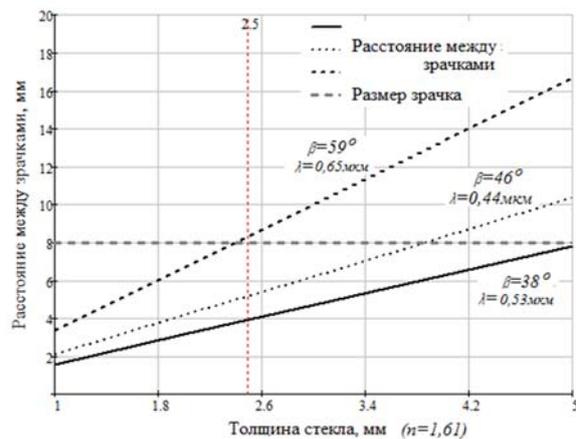
где  $d_p$  — период решетки, мкм;  $\alpha_{\max}$  — максимальный угол падения излучения на вводную решетку из воздуха, град;  $n_{ст}$  — показатель преломления стекла;  $\beta_B$  — угол дифракции (В-компоненты) излучения на вводной решетке, град;  $m$  — рабочий порядок дифракции;  $\lambda$  — рабочая длина волны.

С учетом того, что излучение должно входить в пластину под углом, превышающим угол ПВО, т. е.  $\beta_B \geq \arcsin(1/n_{ст})$ , а угол падения излучения на решетку примем  $\alpha_{\max} = 0$ , формула (2) примет вид:

$$d_p = \frac{\lambda_B}{n_{ст} \sin \beta_B} = \frac{\lambda_B}{n_{ст} \sin(\arcsin(1/n_{ст}))} = 0,45 \text{ мкм.}$$



а) стекло К8



б) стекло ТК16

Рис. 4. Зависимость значения  $L$  от толщины стеклянной подложки для каждой из RGB-компонент

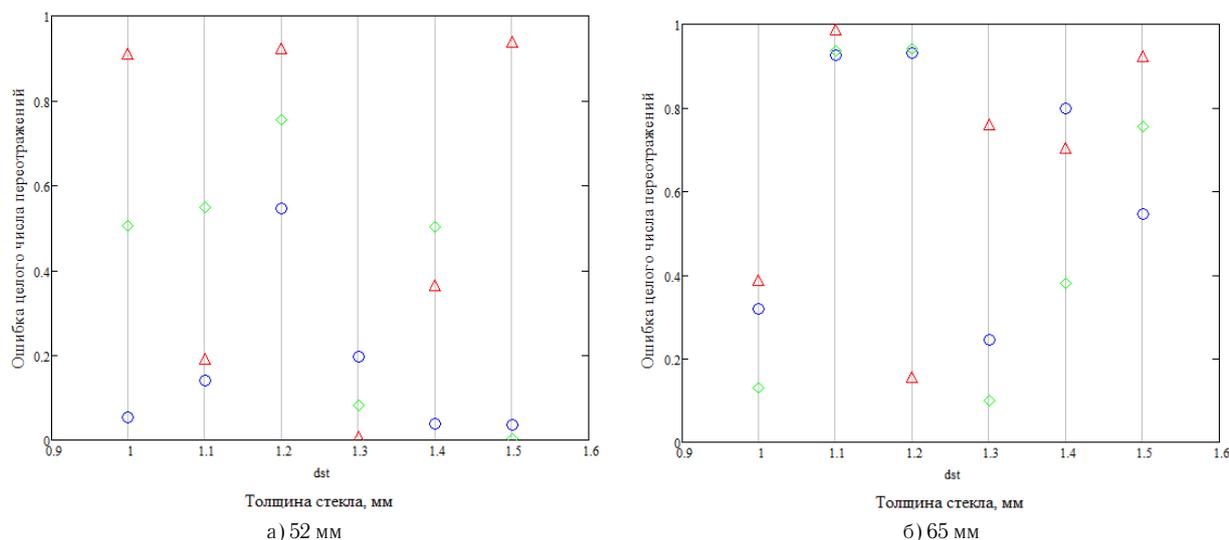


Рис. 5. Графики зависимости ошибки целого числа переотражений излучения каждой из RGB-компонент

Далее с учетом рассчитанного периода решетки определим основные параметры стеклянной подложки, а именно: показатель преломления и толщину. Как было описано выше, показатель преломления определит минимальный угол ПВО, а толщина подложки влияет на условие перекрытия зрачков.

На рисунке 3 показана зависимость значения  $L$  (расстояния, которое проходит луч при ПВО вдоль поверхности подложки) от различных углов дифракции излучения  $\beta$  при различной толщине стеклянной подложки ( $d_{ст} = 1, 2, 3$  и  $4$  мм). Очевидно, что с увеличением угла дифракции и толщины стеклянной подложки расстояние  $L$  увеличивается, что приводит к увеличению требуемого размера выходного зрачка коллимирующей оптической системы.

На рисунке 4 показана зависимость значения  $L$  от толщины стеклянной подложки для каждой из RGB-компонент при фиксированных углах дифракции излучения на вводной решетке периодом  $0,45$  мкм и при выбранном стекле (рассмотрены случаи стекла К8 и ТК16). Из графиков видно, что для выполнения условия  $L \leq \varnothing_{об}$  для каждой из RGB-компонент минимальный размер зрачка коллимирующей оптической системы составляет около  $8$  мм (обозначен горизонтальной пунктирной линией) при толщине стекла  $1,5$  мм (обозначены вертикальными пунктирными линиями) и показателе преломления  $1,51$  (при толщине стекла  $3$  мм это условие выполняется только для RG-компонент) и при толщине стекла  $2,5$  мм и показателе преломления  $1,61$ .

Следующим важным условием является условие ахроматизации индикатора [5]. Это означает, что в случае распространения отдельный RGB-компонент в световодной пластине при различных углах ПВО, обусловленных различными углами дифракции излучения на вводной решетке, выводится эти компоненты должны из одной области пластины. Т. е. расстояние, которое проходят лучи при ПВО вдоль поверхности

подложки, для всех составляющих должно быть одинаковым  $L_R = L_G = L_B$ , но при различном количестве переотражений, которое определяется по формуле

$$N_{\lambda_i} = \frac{L}{2d_{cm} \cdot tg\beta_{\lambda_i}}$$

На практике подобрать период решетки, показатель преломления и длину пластины таким образом, чтобы излучение RGB-компонент вышло из пластины в строго определенной зоне достаточно сложно.

На рисунке 5 показаны зависимости ошибки целого числа переотражений, которые испытывает излучение каждой из RGB-компонент при распространении внутри световодной пластины, в зависимости от толщины стекла при различной длине подложки ( $52$  и  $65$  мм соответственно). Период решетки для ввода излучения составляет  $0,45$  мкм, показатель преломления стекла  $1,51$ , а углы дифракции излучения составляют  $41^\circ$ ,  $51^\circ$  и  $68^\circ$  соответственно, как показано на рисунке 4а. Из графиков видно, что для определенных сочетаний параметров на указанной длине пластины, излучение каждой длины волны испытывает целое число переотражений  $N_{\lambda_i}$ , и выводится из пластины в одной области. Как видно из рисунка 5, условие ахроматизации для

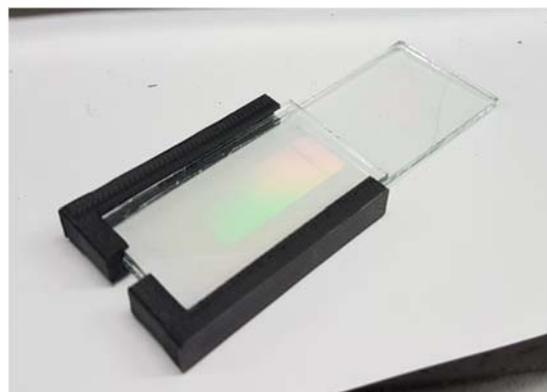


Рис. 6. Фотография экспериментального образца световодной пластины индикатора с пропускающими ДР

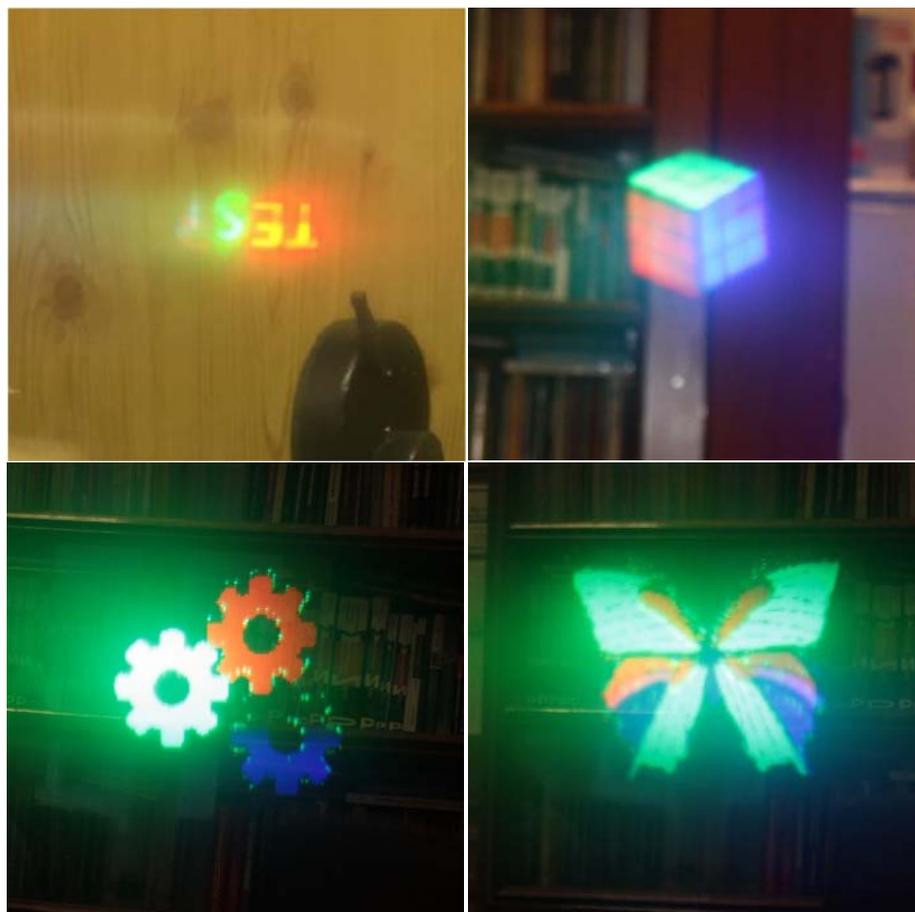


Рис. 7. Фотографии тестовых RGB-изображений, полученных с помощью индикатора

стекла К8 частично выполняется при толщине подложки 1,1 мм на длине 65 мм и толщине 1,5 мм на длине 52 мм.

Для проверки результатов расчета была изготовлена световодная пластина с рассчитанными параметрами: стекло К8 толщиной 1,1 мм с пропускающими ДР периодом 0,45 мкм, размер зрачка коллимирующей оптической системы 8 мм. Фотография образца пластины

показана на рисунке 6. С помощью световодной пластины с ДОЭ в составе индикатора были получены различные тестовые RGB изображения, показанные на рисунке 7, что свидетельствует о работоспособности предложенной схемы и возможности ее использования в устройствах дополненной реальности.

#### Список источников

- [1] Eisen, L. Planar configuration for image projection / L. Eisen, M. Meyklyar, M. Golub, A. Friesem, I. Gurwich, V. Weiss // *Applied Optics*. — 2006. — Vol. 45. — P. 4005–4011.
- [2] Одинок, С. Б. Оптическая схема получения голографического индикатора для отображения знаково-символьной информации / С. Б. Одинок, В. В. Маркин, Д. С. Лушников, А. С. Кузнецов, Е. А. Дроздова, А. Б. Соломашенко // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*. — 2012. — № 8. — С. 158–166.
- [3] Solomashenko, A. V. Design and experiments of combined diffractive optical element for virtual display and indicators / A. V. Solomashenko, S. B. Odinokov, A. Y. Zherdev, M. A. Ruchkina, G. R. Sagatelyan // *Proceedings of SPIE*. — 2015. — Vol. 9508. — P. 95080R.
- [4] Морозов, А. В. Когерентные осветительные системы для голографических дисплеев / Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. — М.: НИЯУ МИФИ. — 2017. — 664 с.
- [5] Путилин, А. Н. Ахроматизация волноводных и ПВО голограмм / А. Н. Путилин, А. В. Морозов, С. Е. Дубынин // *Голография. Наука и практика: 13-я междунар. конф. «ГолоЭкспо 2016»*, Тезисы докладов. — 2016. — 413 с.

## **Augmented reality indicator based on a lightguide plate with transmissive DOEs**

*Ya. A. Grad, V.V. Nikolaev, S.B. Odinkov, A.B. Solomashenko*  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

In this article, the possibility of obtaining a multicolor image using a holographic indicator based on a lightguide plate with diffractive optical elements (DOE) is described. Parameters of a collimating optical system and a lightguide substrate are determined and also experimental studies on obtaining a multicolor image using an indicator are carried out.

**Keywords:** Holographic indicator, Augmented reality, Diffraction grating, Diffractive optical element, Lightguide.

### 3.10. Перцептивные зрительные aberrации

*Г. Г. Голенко*

АО «Спэйс Вижн», Москва, Россия

**Ключевые слова:** Стереопсис, Зрительные направления, Гомункулос, перцептивные зрительные aberrации, Зрительный образ.

#### Введение

В технике вообще и в оптике в частности, получили широкое распространение такие объекты, как изображения. Изображения в общем, но не ограниченном виде, имеют форму математического функционала:

$$(x', y', z', t') = \Pi(x, y, z, t), \quad (1)$$

где  $\Pi$  — аппаратная функция технической системы, не штрихованные координаты — входящие координаты объекта, штрихованные координаты — выходящие, преобразованные системой координаты изображения. Как правило, эти преобразования просты, и, в подавляющем большинстве случаев, не выходят за пределы проекционной геометрии.

В зрительной системе человека все происходит значительно сложнее. Необходимо сделать отступление. Существуют два разных понятия: зрительные иллюзии и перцептивные зрительные aberrации. Зрительные иллюзии, как правило, привязаны по месту к специальным, заранее рассчитанным изображениям типа тестовых. Просмотр таких изображений приводит к возникновению предсказуемых зрительных иллюзий, одинаковых для основной массы наблюдателей. Носителем таких тестов, как правило, является бумага. Весьма оригинальное практическое применение найдено для иллюзий в модельном бизнесе. Поскольку иллюзии изменяют размеры и формы объектов, то нанося на платье клиента соответствующий рисунок, модельер корректирует фигуру клиентов [1]. Книга весьма познавательна, в ней приведены примеры 28 оптических иллюзий.

Известны динамические иллюзии, например, иллюзия бегущей Луны сквозь неподвижные тучки, хотя все происходит с точностью до наоборот. Из психологии следует, доминантной движения является фигура (Луна), а фон (тучки) является пассивным. Причина иллюзий кроется, в основном, в сенсорном психофизическом взаимодействии близко расположенных зрительных направлениях (интерференции зрительных направлений).

Отличия от иллюзий, перцептивные зрительные aberrации — продукт чисто когнитивный, стимулированный не геометрией положения зрительных направлений, а фактической когнитивной ситуацией. Поэтому, перцептивные aberrации могут возникать когда угодно и где угодно. Была бы соответствующая когнитивная, смысловая ситуация.

#### Аконстантность зрительных направлений.

##### Константность главных зрительных направлений

Зрительное направление — это луч, исходящий из некоего фоторецептора сетчатки глаза, проходящий через оптический центр глаза и упирающийся в некую точку рассматриваемого (фиксируемого) объекта. Главное зрительное направление — это луч, исходящий из центральной ямки г сетчатки глаза, оптический центр глаза и точку фиксации взора. В данный момент направление луча не существенно, при необходимости, оно будет оговорено особо.

Зрительные направления по своей природе аконстантны. Рассмотрим общеизвестный пример с изменением видимого диска Луны в зависимости от положения его над горизонтом. При помощи большого зеркала, Боринг (1943), показал, что видимый размер диска Луны над горизонтом в 1,38 раз больше видимого размера того же диска в зените. Очевидно, что атмосферные aberrации здесь не причем. Раушенбах [2] на многочисленных примерах анализа живописных полотен, в частности Сезанна, показал, что геометрические направления наблюдаемых объектов (гор) значительно отличаются от аналогичных перцептивных направлений.

Конечно трудно предположить, что аконстантность зрительных направлений связана с их истинным искривлением или смещением, поскольку зрительные направления жестко фиксированы тремя точками: положением фоторецептора сетчатки, оптическим центром глаза и точкой наблюдаемого объекта. Конечно, все три точки подвижны, но перцептивное изображение константно, и приносит определенную практическую пользу.

На основании вышеизложенного, можно предложить формулу перцептивного преобразования светового поля реального объекта  $(x, y, z, t)$  в его перцептивный зрительный образ  $(x'', y'', z'', t'')$ , через промежуточное преобразование  $P$ .

$$(x', y', z', t') = P(x, y, z, t).$$

Здесь не штрихованные величины относятся к объекту (дистальный или удаленный стимул), штрихованные величины относятся к ретинальному изображению (проксимальный или ближний стимул). Поскольку глаз является частью мозга, то оператор  $P$  является не только оптическим оператором типа  $\Pi$ , но и отчасти когнитивным оператором (внешним оператором) поскольку сетчатка глаза совершает первичную когнитивную обработку ретинального изображения.

Таким образом, всю цепочку преобразований можно представить в виде

$$(x'', y'', z'', t'') = O \times P(x, y, z, t), \quad (2)$$

где  $O$  — внутренний оператор зрительной системы, дважды штрихованные величины являются координатами перцептивного зрительного образа. Сравнивая между собой оператор  $P$  из (1) и операторы  $O \times P$  из (2), то мы видим, что первый оператор механистический, не живой, а вторые операторы вариабильны, живые. В этом их принципиальное отличие.

Если перцептивные образы столь субъективны, то что же в зрительном образе объективно? Объективными, константными являются Главные зрительные направления, поскольку они служат гарантом точного прицеливания из оружия, являются гарантом нашей безопасности на войне и на охоте. Главные зрительные направления, являясь субъективными, однако, полностью совпадают с директрисой прицеливания.

Таким образом, природой заложено, что та часть образа, которая направлена на точку фиксации объекта, является жесткой, константной, а периферийная часть образа аконстантна, способна к деформациям. Такая особенность зрительной системы является объективной основой для возникновения перцептивных зрительных aberrаций.

#### **Бимодальная модель когнитивного зрительного процесса**

Работу зрительной системы по формированию образа можно, достаточно условно, разделить на два типа: оперативную (по Беркли), и творческую, инновационную. В зрительном образе, по Беркли, формируется более или менее постоянный объектный фон, декорацию, внутри которой развивается творческое действие. Задачи для зрительной системы разные, следовательно, и «исполнители» должны быть разные. Во времена фон Гёте, а вполне вероятно, еще раньше, был введен субъект естества — Гомункулус, или Альтер Эго — Второе Я, относящийся к до христианским сущностям. Ближе к нашему времени, Гомункулус из человечка, рожденного гением алхимика в пробирке, применительно к зрительной модальности, превратился в сущность, формирующую образ. Сопоставив, с современных позиций, Гомункулуса и голосферу Бома, можно прийти к выводу, что Гомункулус и голосфера Бома [3], это одна суть — когнитивное поле нашей Вселенной. Другими словами, «автором» перцептивных aberrаций и остальных творческих действий внутри зрительного образа, является Гомункулус.

Автором, применительно к зрительной системе и с учетом разных задач, возникающих при построении образа, была предложена функциональная бимодальная модель зрительного процесса, описанная в [4], которая позволила объяснить некоторые особенности того, что мы видим. Бимодальная модель, при поиске адекватного образа, предполагает циклические подстановки, корректирующие образ, которые производит

Гомункулус, но окончательное решения выносит «Я», или Эго.

#### **Автопортрет Гомункулуса**

По Гёте, Гомункулус рожден в реторте и обречен в ней оставаться вечно. Если он покинет реторту, то он умрет. Но такой печальный конец противоречит фактам. Если открыть Интернет, то там можно увидеть десятки средневековых различных изображений Гомункулуса, но все они представляют его в уродливой форме. Напрашивается вывод, что после выхода из реторты Гомункулус жив, но претерпел значительные метаморфозы, о чем говорят многочисленные свидетельские показания, зафиксированные средневековыми художниками. Попробуем это объяснить.

Вернемся к современным представлениям, согласно которым наша Вселенная многомерна, возможно, одиннадцатимерна. Но тогда и голосфера Бома, или Гомункулус, также многомерен. Если он по каким-то причинам решил проникнуть в наш трехмерный мир, то зрелище будет не тривиальным.

В 1884 г. В Лондоне вышла книга Эдвина Эбота Эбота «Флатландия», в которой описаны приключения двумерного существа в двумерном и трёхмерном мире. В научных кругах, данная книга вызвала огромный резонанс такой силы, что она в 2001 году была переиздана в России [5], а в 2008 году была переиздана в Oxford University Press. В этой книге приведен пример прохождения четырехмерного гиперкуба через наше трехмерное пространство. Прохождение выглядит как последовательную смену трехмерных сечений гиперкуба. Сначала мы видим точку, затем тетраэдр, затем усеченный тетраэдр, потом икосаэдр, снова усеченный тетраэдр, снова тетраэдр и снова точку. Таким образом, прохождение тела многомерной размерности через пространство низшей размерности, меняет радикальным образом форму сечений. Можно предположить, что вид сечений Гомункулуса при прохождении нашего пространства меняется до неузнаваемости, да еще с учетом того, что размерность Гомункулуса, вероятно, существенно больше четырех, что и объясняет множество разных контуров, представляющих Гомункулуса. А наполнение контуров разными мифическими чудовищами легко объяснимо: человеку интуитивно присуще тяга к конкретике, вот художники и расстарались. Необходимо отметить, что все случаи наблюдения метаморфоз Гомункулуса относятся к случаям самонаблюдения, или интроспекции. Основателем интроспекции считается Р. Декарт, XVII в. [6], хотя корни интроспекции тянутся еще к Платону. С III в. до н. э. интроспекция была практически единственным действенным механизмом познания психологии восприятия, затем она была значительно оттеснена инструментальными методами. В настоящее время, интроспекция, наряду с другими методами, является вполне легитимным научным методом, интроспективные методы публикуются в научных статьях и используются в диссертациях. Автор интроспективно наблюдал прохож-

дение Гомункулюса через наше пространство [4]. Трехмерные сечения Гомункулюса предстали в виде кусков сырого мяса, которые дышали. Сечения включали в себя фрагменты уголкового отражателя, Тем самым, из чувства солидарности, Гомункулюс подтвердил выдвинутое ранее автором предположение [7], что для понимания механизма восприятия внешнего зрительного пространства именно как внешнего, в зрительной системе необходимо присутствие фазоинвертора.

#### **Как Гомункулюс предупреждает нас о наличии потенциальной опасности**

Гомункулюс является членом небольшого коллектива, состоящего из двух субъектов: Эго и Альтер Эго. Коллектив этот решает, в основном, когнитивные задачи. Однако, оперативное время решения у членов коллектива существенно разное. Если Эго на решение задач тратит минуты, часы, годы, то Альтер Эго решает свой круг вопросов за доли секунды. Альтер Эго имеет еще одну особенность: согласно экспериментальным данным [8], зрительная система имеет способность экстраполировать зрительные ощущения в пределах долей секунды, т. е., предвидеть будущее. Гомункулюс этой способностью распорядился по-своему. Если он чувствует, что ситуация неопределенная и потенциально может Эго принести ущерб, то он из двух вариантов развития событий: нейтрального и критического, — выбирает именно критический, поскольку бдительность лишней никогда не бывает. А как Гомункулюс может предупредить Эго о возможной опасности? Только напугав его, в доли секунды создав зрительный образ аварийной ситуации. Так он и поступает. Автор наблюдал реакцию Гомункулюса на резкое изменение сюжета при наблюдении изображения, полученного посредством экспериментального объемного телевизора [4, с. 89]. Транслировался концерт Стинга, и оператор резко перешел от среднего плана, с группой музыкантов, к крупному плану руки гитариста. За доли секунды де этого, в наблюдателей полетел рой стеклянных осколков от стекла, на котором был наклеен растр, создававший перцептивный объемный эффект. Возможно, Гомункулюс рассчитывал на нашу психомоторную защитную реакцию отворота в сторону. Мы так и сделали.

Примечателен тот факт, что полностью идентичную реакцию проявили зрители на первый фильм братьев Люмьер «Прибытие поезда». Они также бросились бежать от экрана. Вряд ли зрители испугались паровоза, подходившего на малых парах. Скорее всего, Гомункулюс бросил в них кирпичами, из которых было сложено кафе на бульвара Капуцинов. С тех пор много времени прошло, зрители обвыклись, и с сеансов не убегают. Со временем, зрители привыкнули и к объемному телевидению, и их реакция станет более спокойной.

Еще одно интроспективное относится к имитации Гомункулюсом ДТП [4, с. 91]. В проезде стоял припаркованный автомобиль. Поскольку наблюдение прово-

дилось вне зоны стереопсиса и полностью отсутствовали монокулярные признаки удаленности, то было непонятно, с какой стороны можно его объехать приближающимся автомобилем: либо справа, либо слева, либо его таранить. Гомункулюс, естественно, повел автомобиль на таран. Это было красиво: оба автомобиля были сплющены, хорошо досталось и стоящему за ними дому. Гомункулюс, как всегда, оказался прав. Оба автомобиля были наполнены горючем и электричеством, и при возможном взрыве Эго мог пострадать. Гомункулюс вел себя как профессиональный телохранитель: действовал на опережение (вспомните одноименный фильм с Уитни Хьюстон). У читателя могут закрасться сомнения: а не является ли данный эффект результатом действия тепловой оптической линзы от горячего мотора проезжающего автомобиля. Нет не являются, поскольку данная aberrация сохранялась в течении нескольких секунд после проеза автомобиля.

#### **Динамические перцептивные зрительные aberrации**

Данному типу aberrаций трудно найти простое объяснение, поскольку речь идет о взаимодействии двух объектов, но при этом, причина такого взаимодействия не очевидна. Но эффект имеет место быть, а по сему, должен быть как минимум, описан. К тому же эффекты выглядят достаточно живописно.

Первый эффект возник при пролете китайского фонарика с неработающим двигателем (свеча уже погасла) над соседнем домом [9, с. 71]. Фонарик перед домом резко пошел на снижение, но затем подхваченный восходящим потоком перелетел дом прямо над оголовком шахты лифта. Когда фонарик полностью исчез из вида, началось нечто невообразимое. Массивный железобетонный оголовок был сплюснен в гармошку, и при этом, раскачивался с угловой амплитудой в 45°. Выглядело это так, как бы фонарик инициировал трансформации оголовка. Ну прямо «Закон сохранения количества движения».

Следующий феномен описывается так [9, с. 72]: на полу стоял усеченный круглый цилиндр, в который был поставлен на свое квадратное основание прямоугольный параллелепипед, на сторонах которого были размещены цветные рисунки. По мере приближения наблюдателя к цилиндру, визуальное скошенное основание визуальное, по законам проекционной геометрии, превращалось, с нарастающей скоростью, из окружности в эллипс. При этом, так же с нарастающей скоростью, вставленный параллелепипед начинал, и весьма профессионально, танцевать твист. Если наблюдатель отходил назад, то танец замедлялся, если наблюдатель приближался, то танец убыстрялся, и так до бесконечности.

#### **Заключение**

Перцептивные зрительные aberrации — это особый тип зрительных образов, в которых реальность присутствует в значительно меньшей степени, чем в

собственно зрительном образе. И тем не менее, к зрительным аберрациям не стоит относиться как к химерам, поскольку они даны нам природой, а природа не создает ничего лишнего. Если в Природе мы чего-то не понимаем, то это мы не понимаем, и это наши проблемы, а не Природы.

#### Список источников

- [1] **Сорины, сестры.** Презентация внешности или фигура в одежде и без // Одежда плюс психология. — М.: Гном-Пресс, 1998.
- [2] **Раушенбах, Б. В.** Геометрия картины и зрительное восприятие / Б. В. Раушенбах. СПб.: Азбука-классика, 2002.
- [3] **Ванин, В. А.** Голография-философская основа и научный инструмент нанотехнологий / В. А. Ванин, Б. Г. Турухано, В. А. Шулаков // Мир техники кино. — 2009. — № 12. — С. 28–30.
- [4] **Голенко, Г. Г.** Виртуальная сенсорная структура циклопического глаза, гештальткоррекция перцептивного зрительного образа и перцептивные аберрации зрительной системы / Г. Г. Голенко // Запись и воспроизведение объемных изображений в кинематографе и других областях: V Международная научно-техническая конференция, Москва, 18–19 апреля 2013 г.: Материалы и доклады. — М.: МКБК, 2013. — С. 83–92.
- [5] **Эббот, Э. Э.** Флатландия: Роман о четвертом измерении / Э. Э. Эббот. — М.: Амфора, 2001.
- [6] **Немов, Р. С.** Психологический словарь / Р. С. Немов. — М.: Гуманитар. изд. Центр ВЛАДОС, 2007.
- [7] **Голенко, Г. Г.** Перцептивная теория локального стереопсиса / Г. Г. Голенко // Запись и воспроизведение объемных изображений в кинематографе и других областях: IV Международная научно-техническая конференция, Москва, 26–27 апреля 2012 г.: Материалы и доклады. — М.: МКБК, 2013. — С. 42–64.
- [8] **Лебедев, Д. Г.,** Суровичева Н.С. Прослеживающие движения глаз при некоторых видах стробоскопической стимуляции / Д. Г. Лебедев // Биофизика. — 1986. — Том 31. — № 4. — С. 672–675.
- [9] **Голенко, Г. Г.** Гештальтпсихология монокурсного стереопсиса / Г. Г. Голенко // Запись и воспроизведение объемных изображений в кинематографе и других областях: III Международная научно-техническая конференция, Москва, 21–22 апреля 2011 г.: Материалы и доклады. — М.: МКБК, 2012. — С. 58–78.

## Perceptual visual aberrations

*G. G. Golenko*

Space Vision, Moscow, Russia

From experiment it is known that Visual directions, responsible for the lateral Visual space, akonstantny, and Visual directions to the point of fixation, constants, which creates preconditions for the emergence of Visual aberrations. The immediate cause of this type of aberration is cognitive activity alter ego, or Gomunkuljusa. In this work the Visual aberration, proactive and dynamic Visual aberrations. Considered the passage of Gomunkuljusa, multidimensional sound entity locally, through our three dimensional world.

**Keywords:** Stereopsis, Visual directions, Homunculus, Perceptual visual aberrations, Optical image.

### 3.11. Лазерная связь в условиях города, основанная на использовании орбитального углового момента

Г. К. Красин, М. С. Ковалев, С. Б. Одинокоев, И. Ю. Филиппов, В. Д. Чебурканов

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

В статье проанализированы методы формирования световых пучков с ненулевым орбитальным угловым моментом для задач беспроводной оптической (лазерной) связи на основе логарифмического аксикона, многоуровневого дифракционного оптического элемента, компьютерно-синтезированной голограммы. Разработан метод получения компьютерно-синтезированной голограммы для задания лазерному пучку орбитального углового момента. Реализован тестовый образец такой голограммы.

**Ключевые слова:** Лазерная связь, Орбитальный угловой момент, Турбулентность атмосферы.

Использование лазерной связи в условиях города является очень перспективным направлением в области современных оптико-электронных систем [1, 2]. Пока оптоволоконные системы связи медленно, но верно достигают предела своих передающих возможностей, необходимо разрабатывать новые методы передачи цифровой информации на дальние расстояния. И, казалось бы, применение лазерной связи в свободном пространстве выглядит наиболее привлекательным методом, ведь здесь в качестве передающего канала выступает окружающая нас среда, и мы уйдем от тех ограничений, которые накладывает на нас оптоволоконно, и от необходимости его укладки от точки до точки, между которыми мы хотим передать информацию. Однако основная трудность здесь заключается в турбулентности атмосферы в связи с меняющимися метеорологическими условиями. Существуют различные факторы, приводящие к затуханию света в атмосфере.

Присутствие водяных паров и углекислого газа приводят к поглощению света, наличие частиц пыли и капель воды — к рассеянию. Рефракция пучка вызывается изменением атмосферной температуры вдоль пути распространения пучка. Большую роль играют турбулентности атмосферы, которые вызывают непрерывные изменения рефракции, что в свою очередь приводит к мерцанию, эффекту присутствующему при наблюдении звезд. Рефракция и мерцание затрудняют наведение узкого пучка и вызывают непрерывное изменение уровня мощности принимаемого сигнала [3].

Для решения проблемы передачи света через турбулентную атмосферу используется такая характеристика фотонов, как орбитальный угловой момент фотонов [4], или, условно говоря, их «закрученность» относительно направления распространения. У световой волны, состоящей из таких фотонов, волновой фронт имеет геликоидальный вид.

Закрученность света может быть проиллюстрирована рисунком 1, на котором показаны три характеристики световой волны в зависимости от наличия и знака ее закрученности — волновой фронт (первая колонка), фаза волны в поперечном сечении (вторая колонка), интенсивность света в фокусе (третья колонка).

Закрученность света обладает очень большой информационной емкостью. Пространство состояний тут не двумерно, а, формально говоря, бесконечномерное, что позволяет добиться дополнительного мультиплексирования в оптической линии связи. Хотя использоваться на практике будет лишь конечный набор различных закрученных состояний. Одно из последних достижений здесь — это 100-терабитный канал, реализованный на одном 100-гигабитном носителе, который использует 12-мерное пространство закрученных состояний [5].

Световой пучок несет в себе энергию и одновременно линейный и угловой моменты. Полный угловой момент может содержать вклад спина фотона, связанный с поляризацией, и орбитальный вклад, связанный с пространственным распределением интенсивности и

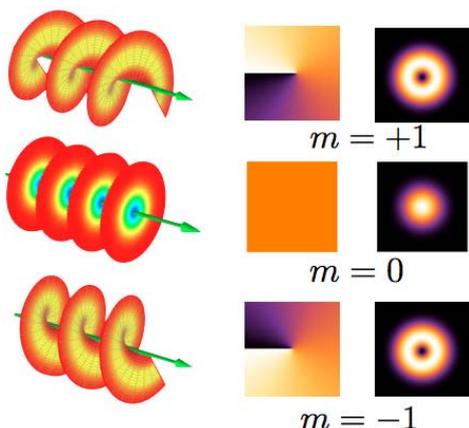


Рис. 1. Характеристики световой волны в зависимости от наличия и знака ее закрученности

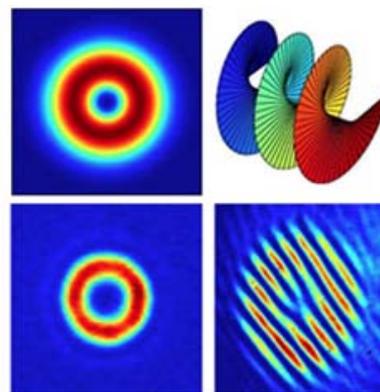


Рис. 2. Примеры световых пучков, имеющих орбитальный угловой момент

фазы. В общем случае, пучок света с единственным пиком интенсивности и гладким волновым фронтом, типа Гауссова пучка, который распространяется в свободном пространстве, не будет иметь азимутальных изменений фазы, и распространение потока энергии будет идти вдоль направления распространения пучка.

Свет с орбитальным угловым моментом проявляет резкие различия, которые изображены на рисунке 2. Это простые примеры световых пучков, несущих орбитальный угловой момент.

Интенсивность светового пучка, как показано на двух изображениях слева, представляет собой темное пятно на оси пучка с нулевой интенсивностью. Такие световые пучки демонстрируют штопоробразное закручивание фазы вокруг оси пучка с нулевой энергией (сверху и справа), то есть оптический вихрь или вортекс. Это закручивание, которое представляет собой фундаментально новую дополнительную степень свободы, можно сделать видимым с помощью вспомогательной плоской волны, которую накладывают на оптический вихрь, для получения интерференционной картины. В поперечном сечении вид такой картины будет зависеть от конкретной закрученности фазы (внизу и справа).

Пучок, несущий один оптический вихрь, представляет собой простейший случай светового пучка, имеющего орбитальный угловой момент. Однако даже такой пучок дает возможность получать множество сложных поперечных узоров, используя свойства оптических вихрей. Свойства, которые могут быть мощным активом для конкретных применений.

С другой стороны, в общем случае, поляризация и пространственные степени свободы связаны уравнениями Максвелла. Однако в пучках, чей размер много больше длины волны, которые, таким образом, распространяются в параксиальном режиме, оба этих свойства можно контролировать отдельно.

Таким образом, появляются различные способы использования закрученного света в практических целях. Например, орбитальный момент света можно использовать как ловушки для материальных частиц, заставляя их вращаться, что является актуальным в микроманипулировании, а также в проектировании и эксплуатации микромашин. Также свет, содержащий вортекс, можно использовать для визуализации и исследования различных физических и биологических свойств вещества, для контроля технологически сложный материалов, и в астрофизике [6].

Данная концепция справедлива и для отдельных фотонов в квантовом мире. Таким образом, ОУМ можно использовать для кодирования квантовой информации, которая переносится в соответствующих фотонных состояниях, для исследования квантовых особенностей в многомерных Гильбертовых пространствах, таких как наблюдение нарушения неравенства Белла в трехмерных Гильбертовых пространствах, для создания новых квантовых состояний или внедрения

новых инструментов для достижения полного контроля над всеми степенями свободы атомов.

Но в данной работе будет рассмотрена возможность практического использования орбитальной углового момента для кодирования цифровой информации и ее дальнейшей передачи с помощью лазерной системы связи по открытому пространству в условиях городской среды.

Например, известен дифракционный винтовой аксикон [7], описывающийся функцией комплексного пропускания следующего вида.

$$\tau(r, \varphi) = \frac{1}{2} [\exp(im_1\varphi) + \exp(im_2\varphi)] + \frac{1}{2} [\exp(im_1\varphi) - \exp(im_2\varphi)] \operatorname{sgn} [\cos(2\pi\nu r + n\varphi)], \quad (1)$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  — номера дополнительных вихревых составляющих,  $r$  и  $\varphi$  — полярные координаты,  $\nu$  — пространственная несущая частота,  $n$  — топологический заряд бинарного аксикона.

С точки зрения геометрии дифракционного оптического элемента (ДОЭ), имеющий функцию пропускания (1), представляет собой дифракционный бинарный аксикон, в выступах которого записана вихревая составляющая  $m_1$ , а во впадинах — вихревая составляющая  $m_2$ , при этом расположение этих зон таково, что в ближней зоне также может формироваться световое поле с топологическим зарядом  $n$ . Будем в дальнейшем называть топологический заряд  $n$  топологическим зарядом структуры. Кроме этого, если в соседних зонах одинаковый топологический заряд, то для структурного разделения таких зон можно добавить к фазе во всей зоне некоторую постоянную величину. Выглядеть это будет как поворот вихревой фазы на некоторый угол. Будем говорить, например, о смещении фазы на полпериода, если этот угол равен  $\pi$ . Формируемые таким ДОЭ световые поля отличаются большим разнообразием распределений интенсивности и фазы, что позволяет говорить о возможности их использования в оптической микроманипуляции для очень широкого диапазона задач.

Для формирования суперпозицию более чем двух вихревых пучков, можно использовать более сложный ДОЭ, основанный на том же принципе. С точки зрения геометрии расположения вихревых зон такой ДОЭ можно представить, как многоуровневый аксикон, в каждом уровне которого записана своя винтовая фаза [8].

Другим способом создания оптического вихря сводится к использованию синтезированной на компьютере голограмме или зонной пластинке [9–11]. Голограмма моделируется из модального шаблона, содержащего закрученности, с использованием плоской волны [9]. Схематическое изображение создания орбитального углового момента у пучка света представлено на рисунке 3. С помощью этого метода можно по-

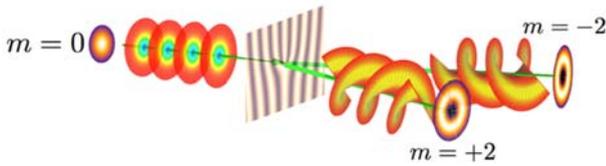


Рис. 3. Схема формирования углового момента у светового пучка

лучить картины и с более сложным узором, но мы рассмотрим только циркулярно-симметричный (кольцевая мода).

Если соединить два когерентных оптических поля  $E_1 \exp(i\varphi_1)$  и  $E_2 \exp(i\varphi_2)$ , то картина результирующего пространственного распределения интенсивности будет определяться как  $2E_1E_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)$ , что является по сути интерференционными полосами. И желаемая интерференционная картина между плоской волной и кольцевой модой низкого порядка будет пропорциональна функции

$$H = \frac{E_0 r}{\omega} \exp\left[-\left(\frac{r}{\omega}\right)^2\right] \exp\left(-\frac{ikr^2}{2R} \pm i\theta\right),$$

где  $k$  — волновое число,  $\omega$  — размер пятна,  $R$  — радиус кривизны Гауссова пучка с кольцевой модой.

Плюс и минус относятся к двум возможным хиральностям винтовой волны. Граница между светлой полосой и темной полосой возникает, когда косинус обращается в нуль, и когда пучки коллинеарны, это означает

$$\pm \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi + \frac{kr^2}{2R}, \quad (2)$$

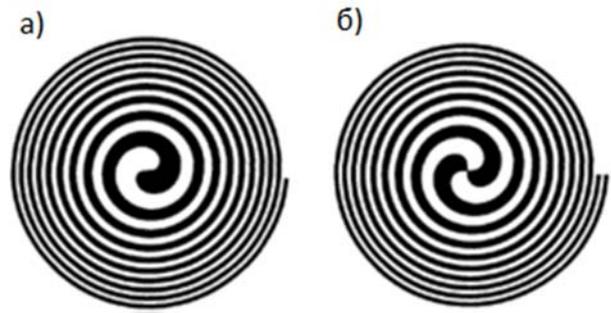
где  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$

Уравнение (2) является уравнением двойной спирали. Используя его, можно изготовить бинарную голограмму (или зонную пластинку) путем затемнения области, где модуляционное условие отрицательное. Это даст структуру, изображенную на рисунке 4, которую можно охарактеризовать как одну из вариаций зонной пластинки Френеля. Как и обыкновенная зонная пластинка, она будет иметь тенденцию образовывать фокусы на таких расстояниях, что волны от всех прозрачных областей транспаранта будут приходить в фазе, а отличие будет в симметрии вдоль оси, нарушенной таким образом, что волны от диаметрально противоположных областей будут гасить друг друга.

Если такую голограмму подсветить когерентным светом, то на выходе восстановится винтовая волна. Уравнение (2) преобразуется для заряда  $p$  кольцевой моды, т. е.,

$$p\theta = \left(p + \frac{1}{2}\right)\pi + \frac{kr^2}{2R}. \quad (3)$$

Зонная пластинка с зарядом 2 изображена на рисунке 4б. Заметим, что  $p = 0$  соответствует стандартной зонной пластинке Френеля.



а — заряд 1, б — заряд 2

Рис. 4. Синтезированные на компьютере зонные пластинки

Если два интерферирующей пучка не коллинеарны, то в выражение (3) добавляется дополнительный член, и оно преобразуется в

$$p\theta = \left(p + \frac{1}{2}\right)\pi + \frac{kr^2}{2R} + krs \sin \gamma \cos \theta,$$

где  $\gamma$  — угол расхождения.

Для синтеза компьютерной голограммы необходимо рассчитать интерференцию опорной наклонной волны  $\psi = \exp(ikx)$  (где  $k$  — пространственная частота, показывающая угол наклона волны) и объектной волны  $\psi_2 = \exp(im\theta)$ , которая несет сингулярность фазы. Затем эта голограмма подсвечивается пучком, содержащим опорную волну (в нашем случае используется Гауссов пучок от лазера), объект восстановится и в выходном пучке появится вихревое поле.

Рассчитывается же такая голограмма, путем создания изображения интерференционной картины пропорциональной функции

$$H = |\psi_1 + \psi_2| = |\exp(ikx) + \exp(im\theta)|^2 = 2[1 + \cos(kx - m\theta)],$$

где  $\theta = \text{tg}^{-1}(y/x)$  — полярная координата.

На рисунках 5 а–ж показаны графики  $H$  для  $m$  от 1 до 6. Когда один из голографических шаблонов подсвечивается Гауссовым пучком  $\psi_G = \exp(-r^2/\omega^2)$  с шириной  $\omega$ , получаемая дифракционная картина в дальней зоне дифракции Фраунгофера пропорциональна преобразованию Фурье произведения  $\psi_G H$  входной функции и голографической передаточной функции  $H$ .

Таким образом, интенсивность света в плоскости далекой от компьютерных голограмм определяется формулой

$$I = F[\psi_G H] = F\left[\exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right) \exp(ik_x x) + \exp(im\theta)\right]^2,$$

где  $k_x$  —  $x$ -компонента волнового вектора опорной волны.

Результат посчитан на стандартном математическом программном обеспечении и изображен на рисунке 5ж для  $m = 1$ . Как можно видеть на рисунке 5ж, преобразование Фурье от  $\psi_G H$  дает центральный Гаусс-

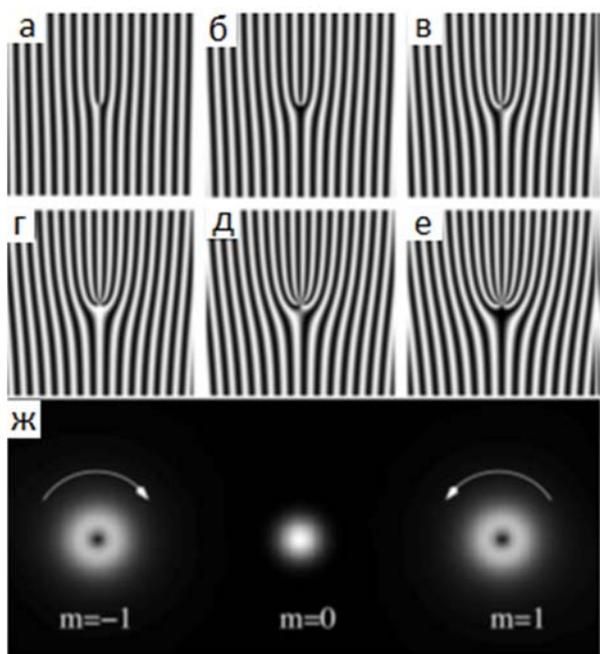


Рис. 5. Интерференционные шаблоны для создания вихревых с зарядами от 1 до 6 (а–ж), распределение интенсивности соответствующее подсвечиванию Гауссовым пучком синтезированной голограммы с  $m = 1$

сов пучков (дифракционный порядок  $n = 0$ ) и два смежных пучка, соответствующих порядка дифракции  $n = 1$ ,  $n = -1$ , и несущих фазовую сингулярность  $m = 1$  и  $m = -1$  соответственно. Распределение интенсивности, показанное на рисунке 5ж, одинаковое для обеих вихрей. Однако фазовое распределение вращается в противоположном направлении. Для  $m = 1$  — вращение против часовой стрелки и для  $m = -1$  — по часовой. Результат можно объяснить, если принять во внимание, что Гауссов пучок включает в себя плоскую волну  $\psi_1$ , используемую для записи голограммы, то есть он может быть использован для восстановления объектного пучка  $\psi_2$  (азимутальной фазы).

Для проверки значений  $m$  для пучков на рисунке 5ж численно вычисляется интерференция пучков с  $m = \pm 1$  с плоской волной. Результат показан на рисунке 6, где изображены картины, соответствующие интерференции пучка с  $m = \pm 1$  и наклонной плоской волной (рисунки 6а и 6б, соответственно). Интерференция между пучком с  $m = 1$  и сферическим волновым фронтом показана на рисунке 6в. На рисунках 6г и 6д, соответственно, показаны интерференционные картины пучков с  $m = \pm 2$  и плоской волной, и на рисунке 6е — пучок с  $m = 2$  и сферическая волна.

После расчета и получения компьютерно-синтезированной голограммы проекционным способом [12] освещаем её лазерным лучом, в результате чего становится возможным наблюдать закрученности в каждом порядке полученной дифракционной картины. Схема описываемого эксперимента изображена на рисунке 7. А результат эксперимента продемонстрирован на ри-

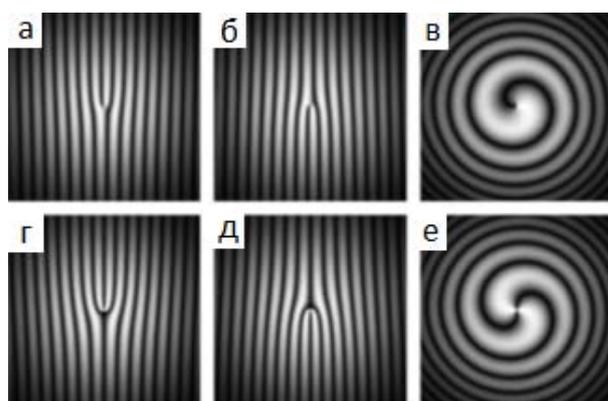


Рис. 6. Интерференционные картины пучков с топологическим зарядом  $m$  и различными плоскими волнами

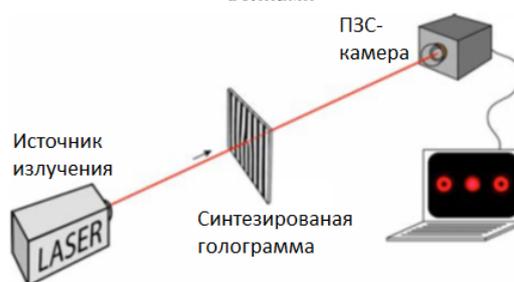


Рис. 7. Схема получения вихревых с помощью синтезированной на компьютере голограммы

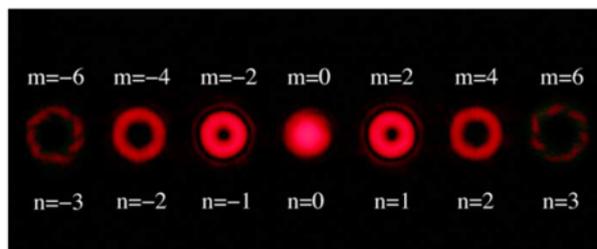


Рис. 8. Дифракционные картины от пропускания пучка He–Ne лазера через синтезированную на компьютере голограмму с зарядом  $m = 2$

сунке 8, где изображены дифракционные картины получены путем использования голографической маски с зарядом 2. Можно видеть два интересных свойства итоговой дифракционной картины: все дифракционные порядки в своих границах имеют оптические закрученности, и топологический заряд вихрекса задается через  $nm$ , где  $n$  является порядком дифракции, а  $m$  — зарядом шаблона; вращение фазы меняет знак на каждой стороне дифракционного максимума.

В данной работе проведен анализ различных дифракционных и голограммных оптических элементов для задания лазерному пучку орбитального углового момента. Разработан метод расчета и стенд для получения тестовых компьютерно-синтезированных голограмм, формирующих световые пучки с ненулевым орбитальным угловым моментом для задач лазерной связи. Рассмотрен вариант построения лазерной связи на основе созданных тестовых голограмм.

### Список источников

- [1] **Gibson, G.** Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum / G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S. M. Barnett, S. Franke-Arnold // *Optics Express*. — 2004. — Vol. 12. — P. 5448–5456.
- [2] **D'Ambrosio, V.** Complete experimental toolbox for alignment-free quantum communication / V. D'Ambrosio, E. Nagali, S.P. Walborn, L. Aolita, S. Slussarenko, L. Marrucci, F. Sciarrino. // *Nat Commun*. — 2012. — 3:961. — DOI: 10.1038/ncomms1951.
- [3] **Гауэр, Дж.** Оптические системы связи / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1989. — 504 с.
- [4] **Berry, M.** The elliptic umbilic diffraction catastrophe / M. Berry, J. Nye, F. Wright // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* — 1979. — Vol. 291. — P. 453–484.
- [5] **Huang, H.** 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength / H. Huang, G. Xie, Y. Yan, N. Ahmed, Y. Ren, Y. Yue, D. Rogawski, M. J. Willner, B. I. Erkmen, K. M. Birnbaum, S. J. Dolinar, M. P. J. Lavery, M. J. Padgett, M. Tur, A. E. Willner // *Optics Letters*. — 2014. — Vol. 39. — № 2.
- [6] **Krenn, M.** Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna / M. Krenn, R. Fickler, M. Fink, J. Handsteiner, M. Malik, T. Scheidl, R. Ursin, A. Zeilinger // *New Journal of Physics*. — 2014. — Vol. 16.
- [7] **Skidanov, R. V.** Superposition of vortex beams of light to capture and movement of biological micro objects / R. V. Skidanov, M. A. Rykov // *Computer Optics*. — 2013. — Vol. 37. — № 4. — P. 431–435.
- [8] **Скиданов, Р. В.** Дифракционные оптические элементы для формирования вихревых пучков в задаче манипулирования микрообъектами / Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская // *Компьютерная оптика*. — 2014. — Том 38. — № 1.
- [9] **Betin, A. Y.** A combination of computer-generated fourier holograms and light guide substrate with diffractive optical elements for optical display and sighting system / A. Y. Betin, S. S. Dontchenko, M. S. Kovalev, S. B. Odinkov, A. B. Solomashenko, E. Y. Zlokazov // *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*. — 2015. — P. 410.
- [10] **Kodatskiy, B.** Fourier holography in holographic optical sensors / B. Kodatskiy, M. Kovalev, P. Malinina, S. Odinkov, M. Soloviev, V. Venediktov // *Proceedings of SPIE: Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XIX*. — Vol. 10002. — P. 100020K. — DOI: 10.1117/12.2242008.
- [11] **Heckenberg, N. R.** Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms / N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith, A. G. White // *Optics Letters*. — Vol. 17. — № 3. — 1992.
- [12] **Кузнецов, А. С.** Оптическая система для записи мультиплексных микроголограмм на фоточувствительный материал в системе голографической памяти / А. С. Кузнецов, С. Б. Одинок, Н. М. Вереникина, В. В. Маркин, Д. С. Лушников, А. Ю. Павлов, М. С. Ковалев, А. Б. Соломашенко // *Естественные и технические науки*. — 2011. — Том 54. — № 4. — С. 405–406.

## Laser communication in urban conditions, based on the use of orbital angular momentum

*G. K. Krasin, M. S. Kovalev, S. B. Odinkov, I. Y. Filippov, V. D. Cheburkanov*  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The methods of forming light beams with nonzero orbital angular momentum for wireless optical (laser) communication problems based on the logarithmic axicon, multilevel diffractive optical element, computer-synthesized hologram are analyzed in the article. A method has been developed for obtaining a computer-synthesized hologram for setting the orbital angular momentum to a laser beam. A test sample of such a hologram was realized.

**Keywords:** Laser bond, Orbital angular momentum, Atmospheric turbulence.

4. Голограммные и дифракционные  
оптические элементы:  
методы компьютерного синтеза,  
метаматериалы, плазмонные структуры  
и технологии изготовления



#### 4.1. Состояние и тенденции развития технологий получения светосильных дифракционных решеток

*А. В. Лукин, А. Н. Мельников*

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

В докладе приведен анализ состояния и рассмотрены пути развития технологий получения светосильных дифракционных решеток на выпуклых и вогнутых рабочих поверхностях. Показана возможность создания решеток этого типа на основе использования специального лезвийного алмазного инструмента в делительных машинах маятникового типа.

**Ключевые слова:** Светосильные дифракционные решетки, Технология получения, Специальный лезвийный алмазный инструмент, Делительная машина маятникового типа.

При создании компактной и светосильной аналитической спектральной аппаратуры для ряда ведущих областей науки, техники и промышленности (минералогия, медицина, криминалистика, дистанционное зондирование Земли и др.) необходимо использовать светосильные дифракционные решетки с высокой дифракционной эффективностью на выпуклых и вогнутых рабочих поверхностях с большой стрелкой прогиба.

В настоящее время дифракционные решетки подобного типа изготавливаются на основе применения следующих технологий [1–6]:

- нарезная технология, реализуемая с использованием делительных машин классического типа;
- интерферометрические (голографические) технологии;

- фотолитографические технологии;
- 3D-технологии многофотонной полимеризации в фотополимерных материалах.

Анализ показывает, что наиболее полное удовлетворение требований к дифракционным решеткам указанных применений достигается при помощи нарезной технологии. Однако конструкция функционирующих в настоящее время классических делительных машин лимитирует получение дифракционных решеток с заданными параметрами по светосиле и дифракционной эффективности.

Показано, что на основе реализации принципа физического маятника в делительной технике можно преодолеть указанные ограничения.

#### Список источников

- [1] Корпорация «Hitachi Group» / URL: <http://www.hitachi-hightech.com>.
- [2] Холдинг АО «Швабе» / АО «НПО «ГИПО» / Каталог оптической компонентной базы / URL: <http://shvabe.com/about/company/gosudarstvennyy-institut-prikladnoy-optiki/produktsiya-gipo/opticheskie-materialy>.
- [3] Корпорация «HORIBA Jobin Yvon Ltd.» / URL: <http://www.horiba.com/scientific/products/diffraction-gratings/for-industrial-applications>.
- [4] ООО «ХолоГрэйт» / URL: <http://holograte.com/produktyi/golograficheskie-difrakcionnyie-resheniya/difrakcionnyie-reshetki-dlya-spektralnyix-priborov>.
- [5] **Верхогляд, А. Г.** Круговая лазерная записывающая система для изготовления ДОЭ на сферических поверхностях / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, Л. Б. Касторский, А. Е. Качкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков, О. Ю. Моисеев, А. Г. Полещук, Р. В. Шиманский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «СибОптика 2015»: сб. материалов в 3 томах. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). — Новосибирск: СГУТ, 2015. — Том 2. — С. 62–68.
- [6] Компания «Altechna Company Group» / URL: <http://www.altechna.com>.

### The status and trends in the development of technologies for manufacturing high-aperture diffraction gratings

*A. V. Lukin, A. N. Melnikov*

Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

In the present paper we analyze the status and review the development of technologies for manufacturing high-aperture diffraction gratings on convex and concave operating surfaces. The possibility of creating gratings of this type is shown on the basis of using a special edge diamond tool in pendulum-type ruling engine.

**Keywords:** High-aperture diffraction gratings, Technology for manufacturing, Special edge diamond tool, Pendulum-type ruling engine.

## 4.2. Дифракционный метод контроля поверхностных нано и микроструктур компьютерно-синтезированных голограмм

Д. А. Белоусов, А. Г. Полецук, В. Н. Хомутов

Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Представлены результаты разработки и исследования дифракционного метода и устройств для контроля параметров компьютерно-синтезированных голограмм с нано и микроповерхностным рельефом. Показана возможность контроля таких параметров как дифракционная эффективность, периоды и угловая ориентация дифракционных структур исследуемого элемента. Разработанные дифракционные методы предназначены для осуществления оперативного контроля параметров нано и микро-рельефа компьютерно-синтезированных голограмм в процессе производства.

**Ключевые слова:** Дифракционная оптика, Компьютерно-синтезированные голограммы, Измерительная система, Обработка изображений.

### Введение

Компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ) широко применяются в различных высокотехнологических отраслях промышленности, научных системах и оборудовании, а также во множестве приборов и устройств, окружающих нас в повседневной жизни. Основной функцией КСГ является преобразование исходного волнового фронта в волновой фронт с заданными параметрами. Данное преобразование осуществляется за счёт дифракции излучения на поверхностном рельефе КСГ, который чаще всего имеет бинарную, кусочно-непрерывную или ступенчатую форму с глубиной порядка нескольких микрометров. Современное развитие оптики требует от оптических элементов не только выполнения требуемого преобразования исходного волнового фронта, но и соответствие жёстким критериям по параметрам энергетической эффективности и низкому светорассеянию, на которые влияет любое отклонение рельефа КСГ от заданных параметров. В связи с этим на каждом этапе производства таких элементов, крайне важно контролировать параметры изготавливаемого рельефа. Однако структура КСГ может быть настолько сложной, или, что бывает довольно часто, покрыта защитной плёнкой, что делает невозможным осуществление контроля известными прямыми методами. Таким образом актуальной является задача разработки косвенных методов контроля таких элементов.

В лаборатории Дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН разработан метод дифракционного контроля параметров КСГ на основе которого созданы сканирующие устройства, позволяющие получать карту важнейших характеристик, таких как дифракционная эффективность (ДЭ), период и ориентация структур, по всей площади исследуемого элемента.

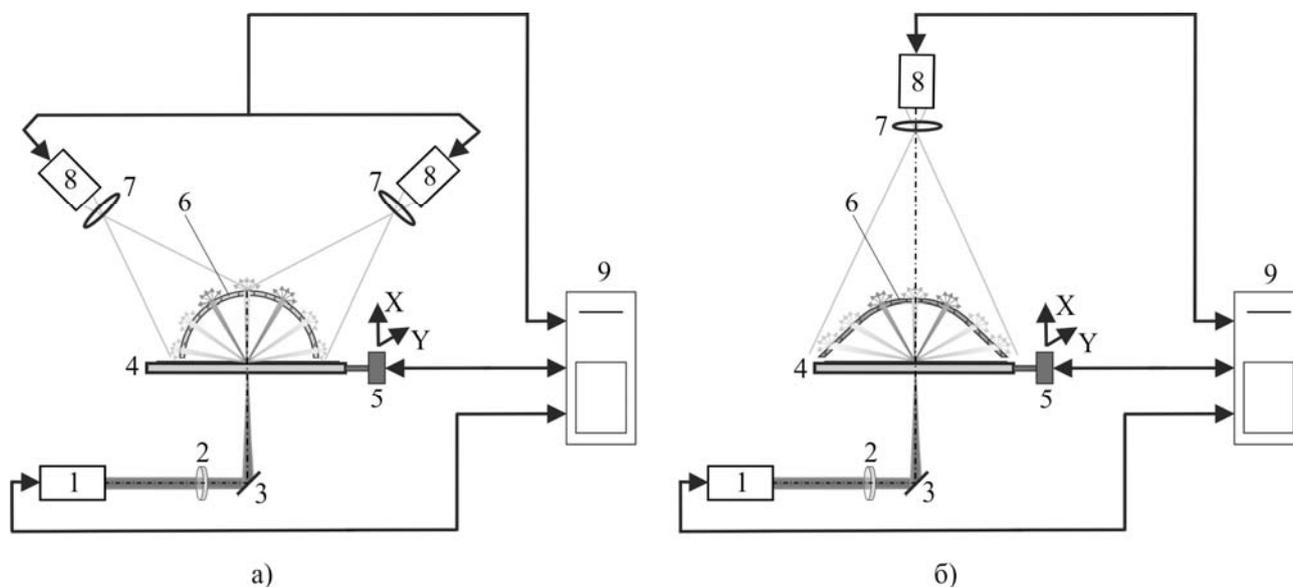
### Метод дифракционного контроля компьютерно-синтезированных голограмм

Дифракционный метод контроля подразумевает сканирование структуры, исследуемой КСГ сфокусированным лазерным пучком и регистрацию параметров дифрагированного излучения, таких как интенсивность и положение дифракционных порядков в каждой точке сканирования. На основе этих данных затем рассчитывается и строятся карты ДЭ, периодов и угловой

ориентации дифракционных структур по всей площади исследуемого элемента. Устройства, работающими на описанном методе, представлены в работах [1, 2].

Период рельефа компьютерно-синтезированных голограмм может меняться от нескольких сотен нанометров до нескольких десятков, или сотен микрометров. Это приводит к тому, что дифракционная картина, формируемая поверхностной структурой исследуемого элемента может лежать в широком диапазоне углов дифракции вплоть до  $\pm 90^\circ$ . Ориентация дифракционных структур на локальном участке поверхности исследуемой КСГ может быть произвольной, таким образом зарегистрировать дифракционную картину необходимо по азимутальному углу ориентации дифракционных структур  $360^\circ$ . Для того чтобы иметь возможность зарегистрировать дифракционную картину в таком широком угловом диапазоне предлагается использовать рассеивающие экраны, которые могут быть выполнены различным образом. На рисунках 1а и 1б показаны схемы автоматических устройств, использующие для регистрации дифракционной картины сферический и параболический рассеивающие экраны, соответственно. Устройства подобного типа имеют общий принцип работы. Когерентное излучение от лазерного источника 1, с помощью линзы 2 и поворотного зеркала 3 фокусируется на исследуемой КСГ 4, которая в свою очередь установлена на XY-координатном столе 5. Падающее на исследуемый элемент излучение дифрагирует и попадает на поверхность рассеивающего экрана 6, после чего регистрируется видеокамерой 8 с проекционным объективом 7 (или несколькими видеокамерами с проекционными объективами). Зарегистрированная дифракционная картина обрабатывается управляющим компьютером. Далее, исследуемый элемент перемещается и регистрируется дифракционная картина в следующей точке элемента. По окончании сканирования управляющий компьютер выдаёт пользователю карты распределения ДЭ, периодов и углов ориентации дифракционных структур по всей площади элемента.

Как показано на рисунке 1а, для того чтобы иметь возможность зарегистрировать дифракционную картину в широком угловом диапазоне, при использовании сферического рассеивающего экрана необходимо несколько видеокамер (не менее трёх), что усложняет



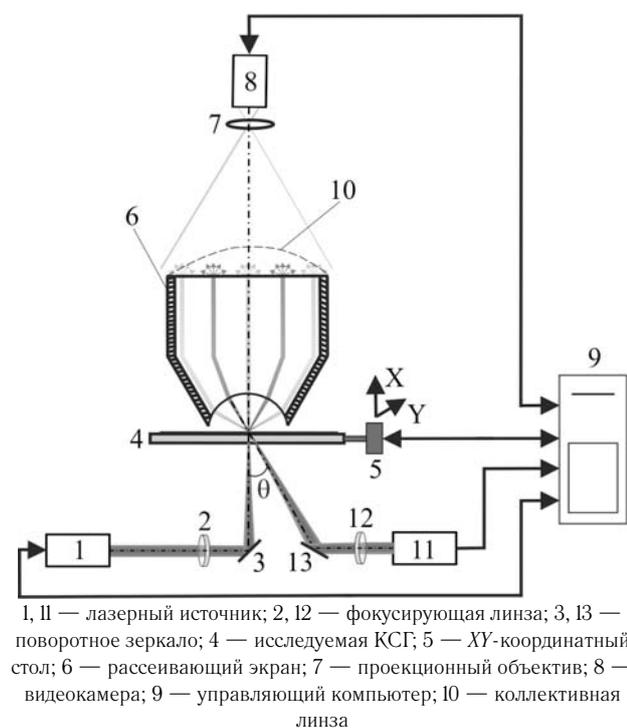
1 — лазерный источник; 2 — фокусирующая линза; 3 — поворотное зеркало; 4 — исследуемая КСГ; 5 — XY-координатный стол; 6 — рассеивающий экран; 7 — проекционный объектив; 8 — видеокамера; 9 — управляющий компьютер

Рис. 1. Схема автоматического устройства для регистрации параметров дифрагированного излучения со сферическим (а) и параболическим (б) рассеивающим экраном, соответственно

конструкцию, а также программное обеспечение, так как необходимо производить сшивку полученных изображений.

При использовании параболического рассеивающего экрана достаточно всего лишь одной видеокамеры (рисунок 1б), однако недостатком такой концепции автоматического устройства является ухудшение разрешения системы при увеличении угла дифракции. Более подробно о системах со сферическим и параболическим экранами написано в работе [3].

Учитывая недостатки вышеописанных систем был разработан ещё один метод позволяющий регистрировать дифракционную картину в широком угловом диапазоне. Было предложено использовать оптоволоконный рассеивающий экран, изготовленный специальным образом (рисунок 2). Один торец оптоволоконного рассеивающего экрана выполнен в виде сферического сегмента и устанавливается таким образом, чтобы сфокусированное излучение на поверхности КСГ находилось в центре радиуса его кривизны. Такое расположение позволяет избежать искажения формы дифракционных порядков в зависимости от угла дифракции. Второй торец оптоволоконного рассеивающего экрана, на который переносится дифракционная картина может иметь как плоскую, так и выпуклую форму (штриховая линия на рисунок 2), формируя таким образом на поверхности оптоволоконного экрана коллективную линзу, что увеличит светопередачу дифрагированного



1, II — лазерный источник; 2, 12 — фокусирующая линза; 3, 13 — поворотное зеркало; 4 — исследуемая КСГ; 5 — XY-координатный стол; 6 — рассеивающий экран; 7 — проекционный объектив; 8 — видеокамера; 9 — управляющий компьютер; 10 — коллективная линза

Рис. 2. Схема автоматического устройства для регистрации параметров дифрагированного излучения с оптоволоконным рассеивающим экраном

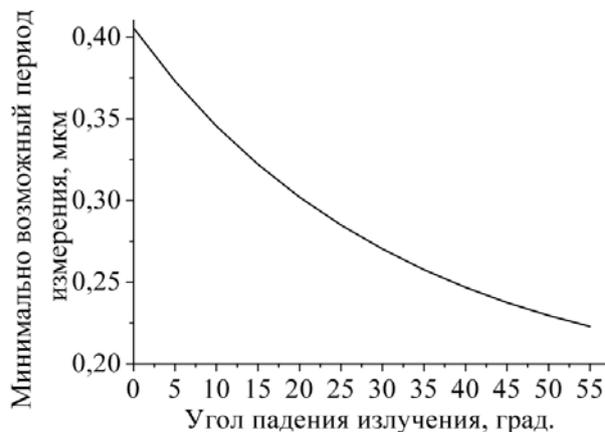


Рис. 3. Зависимость минимально измеряемого периода от угла падения когерентного излучения на исследуемую КСГ при использовании лазерного источника с длиной волны 405 нм

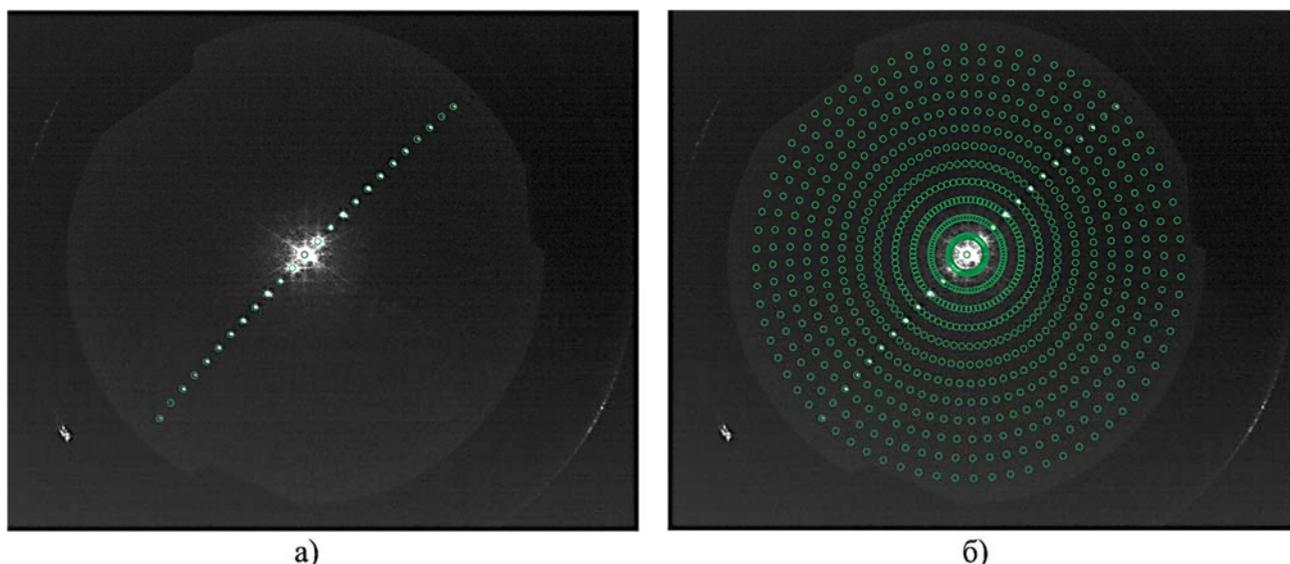


Рис. 4. Регистрация центров дифракционных порядков эталонной линейной дифракционной решётки с периодом 8 мкм (а) и полученная калибровочная сетка (б)

излучения на светочувствительную матрицу видеокамеры.

Как показано на рисунке 2, в автоматическое устройство (не зависимо от используемого рассеивающего экрана) может быть введён как минимум еще один лазерный источник *II*, излучение которого падает на исследуемый элемент под углом  $\alpha$ . Использование излучения, падающего не под прямым углом на исследуемую структуру КСГ, позволяет уменьшить минимальный период рельефа, который можно контролировать на разработанном устройстве. На рисунке 3 показана зависимость минимально измеряемого периода от угла падения излучения на исследуемый элемент, при использовании лазерного источника с длиной волны 405 нм.

Длина волны излучения лазерных источников *I* и *II* (рисунок 2) может быть, как одинаковой, так и различной. При введении в устройство источника излучения *II*, не рекомендуется исключать лазерный источник *I*, так как падающее под прямым углом излучение удобно использовать для калибровки измерительной системы перед началом работы.

Калибровка системы представляет собой регистрацию дифракционных картин ряда эталонных линейных дифракционных решёток (рисунок 4а), с одинаковым периодом, но с разной угловой ориентацией, и сопоставление теоретически известных угловых параметров дифрагированного излучения с координатами центров зарегистрированных дифракционных порядков. Просканировав все калибровочные дифракционные структуры с различной угловой ориентацией, получаем калибровочную сетку (рисунок 4б), которая позволяет сопоставить координаты на матрице видеокамеры, с углами дифракции и с угловой ориентацией структур. Так же можно использовать КСГ, дифракционная картина которой лежит в широком угловом диапазоне.

### Экспериментальные результаты

В устройстве с оптоволоконным рассеивающим экраном был использован лазерный источник с длиной волны 635 нм. Калибровка проводилась сканированием 36 линейных амплитудных дифракционных решёток с периодом 8 мкм. Угол ориентации каждой последующей эталонной дифракционной структуры отличался от предыдущей на  $5^\circ$ . Полученная калибровочная сетка представлена на рисунке 4б.

В таблице 1 приведено сравнение ДЭ одной из эталонных дифракционных решёток с периодом 8 мкм и угловой ориентацией  $45^\circ$ , полученная с помощью разработанного устройства и методом последовательного сканирования дифракционных порядков светочувствительным датчиком. Динамический диапазон используемой нами видеокамеры не позволил зарегистрировать параметры всех дифракционных порядков с помощью одного захваченного кадра, в связи с этим измерения проводились на различных временах экспозиции, от 0,009 до 25 мс (всего было использовано 35 различных времён экспозиции).

После калибровки устройства было проведено исследование параметров поверхностного микрорельефа тестовой линейной дифракционной решётки с периодом 6 мкм и углом ориентации  $45^\circ$ . В результате контроля тестовой структуры получено среднее значение периода микрорельефа 5,996 мкм, а средняя угловая ориентация составила  $44,94^\circ$ .

### Заключение

Предложен и экспериментально апробирован метод дифракционного контроля параметров поверхностного рельефа КСГ с широким диапазоном изменения периодов. Разработанные устройства с использованием рассеивающих экранов различной конфигурации позволяют оперативно регистрировать такие параметры дифрагированного излучения как интенсивность и угловое распределение дифракционных порядков.

Таблица 1. Сравнение дифракционной эффективности, полученной на разработанном устройстве с данными полученными методом последовательного сканирования

Номер дифракционного порядка	ДЭ, полученная на разработанном устройстве (%)	ДЭ, полученная методом последовательного сканирования (%)	Разность полученных результатов ДЭ
12	0,0189	0,0253	-0,00641
11	0,00637	0,0048	0,00162
10	0,0441	0,03	0,0142
9	0,017	0,0167	0,000211
8	0,0498	0,0538	-0,00394
7	0,0544	0,0574	-0,00301
6	0,136	0,0688	0,0668
5	0,29	0,2083	0,0813
4	0,107	0,1018	0,00474
3	0,852	0,8266	0,0257
2	0,121	0,1582	-0,0367
1	9,36	9,2469	0,112
0	31,1	31,103	0,00004
-1	9,04	9,145	-0,11
-2	0,197	0,1408	0,0564
-3	0,733	0,7642	-0,0312
-4	0,0983	0,0915	0,00678
-5	0,151	0,2202	-0,0687
-6	0,0721	0,0886	-0,0165
-7	0,062	0,0574	0,00459
-8	0,0669	0,0561	0,0108
-9	0,0218	0,0166	0,00528
-10	0,0475	0,0358	0,0117
-11	0,00605	0,004	0,00207
-12	0,0136	0,0253	-0,0117

Экспериментально показано, что последующая математическая обработка полученных данных позволяет с высокой точностью определить наиболее важные характеристики исследуемого элемента, ДЭ, период и угловую ориентацию дифракционных структур по всей его площади. Кроме того, полученные данные ДЭ могут быть использованы для определения скважности, глубины и формы рельефа исследуемой КСГ [4, 5].

#### Благодарности

Данная работа поддержана грантом РФФ № 17-19-01721.

#### Список источников

- [1] **Cai, W.** Diffractive optics calibrator measurement of etching variations for binary computer-generated-holograms/ W. Cai, P. Zhou, C. Zhao, J. Burge. // *Applied Optics*. — 2014. — № 53. — P. 2477–2486
- [2] **Хомутов, В. Н.** Измерение дифракционной эффективности ДЭ по многим порядкам дифракции / В. Н. Хомутов, А. Г. Полещук, В. В. Черкашин // *Компьютерная оптика* — 2011. — Том. 35. — С. 196–201.
- [3] **Белюсов, Д. А.** Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой/ Д. А. Белюсов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов // *Компьютерная оптика*. — 2015. — Том. 39. — № 5. — С. 678–687.
- [4] **Быстров, Ю. А.** Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве / Ю. А. Быстров, Е. А. Колгин, Б. Н. Котлецов — М.: Радио и связь, 1988. — С. 168.
- [5] **Волков, А. В.** Контроль параметров микрорельефа ДЭ с использованием тестовых дифракционных структур / А. В. Волков // *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-тех. науки*. — 2001. — № 12. — С. 179–185.

## Diffraction method for the nano and micro structures inspection of the computer-generated holograms

*D. A. Belousov, A. G. Poleshchuk, V. N. Khomutov*

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The results of the diffraction method and devices development and investigation for the parameters inspection of computer-generated holograms with nano and micro surface relief are presented. The possibility of such parameters inspection for investigated element as diffraction efficiency, periods, and angular orientation is shown. The developed diffraction methods are designed for on-line inspection of the nano and micro relief parameters of computer-generated holograms in the manufacturing process.

**Keywords:** Diffractive optics, Computer-generated holograms, Measuring system, Image processing.

### 4.3. Исследование коррекционных возможностей вогнутой голограммной дифракционной решетки в схеме малогабаритного спектрофлуориметра

Н. К. Павлычева, Р. Р. Ахметгалеева

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

Малогабаритные спектрофлуориметры весьма востребованы при проведении различных исследований, таких как мониторинг гидротехнических сооружений, решение задач технологического контроля, медицинская диагностика и т. д.

Ранее нами была представлена оптическая схема малогабаритного спектрофлуориметра со следующими характеристиками: спектральный рабочий диапазон 250–900 нм, частота штрихов вогнутой голограммной дифракционной решетки в ее вершине  $N = 441,54$  штр./мм, угол падения лучей на решетку  $\varphi = 20^\circ$ , радиус кривизны решетки 100 мм, длина спектра  $l = 28$  мм, обратная линейная дисперсия  $d/dl = 23,2$  нм/мм, относительное отверстие 1:3,3 [1].

Такую же дисперсию можно получить, используя установку, в которой угол падения лучей меньше углов дифракции. При значении угла падения  $\varphi$  равно  $-2^\circ$ , обеспечивающем возможность размещения входной щели и диодной линейки без введения плоского зеркала, нами было проведено исследование абберационных характеристик двух вариантов оптических схем.

При расчете вариантов оптических схем число штрихов выбиралось таким, чтобы длина спектра соответствовала длине приемной площадки диодной линейки ( $\approx 28$  мм). Для каждого значения расстояния от входной щели до вершины решетки  $d$  определялись значения расстояния от вершины решетки до поверхности регистрации  $d'_{cp}$  для средней длины волны рабочего спектрального диапазона 575 нм и  $H_1$ , при которых обеспечивается минимальная дефокусировка на плоскости [2]. Плоскость регистрации спектра перпендикулярна лучу средней волны спектрального диапазона, дифрагированному в вершине решетки. Длина волны лазера для записи голограммных решеток принималась равной 441,6 нм.

В качестве варианта 1 рассмотрена оптическая схема, имеющая примерно одинаковые расстояния от

входной щели до вершины решетки и от вершины решетки до плоскости регистрации спектра ( $d \approx d'$ ). Оптическая схема имеет следующие конструктивные параметры:  $d = 100,9$  мм,  $d'_{cp} = 101,0$  мм,  $\varphi = -2^\circ$ ,  $N = 410$  штр./мм, угол дифракции для средней длины волны  $\varphi'_0 = 15^\circ 42'$ , обратная линейная дисперсия 23,0 нм/мм. Параметры записи определялись из соотношений для коэффициентов голографирования  $H_1$ ,  $H_2$  и  $H_3$ . При этом значение  $H_1$  было найдено из условия минимизации дефокусировки на плоскости, значения  $H_2$  и  $H_3$  соответствовали равенству нулю в центре спектрального диапазона астигматизма и меридиональной комы, соответственно. Параметры записи имеют следующие значения:  $d_1 = 212,48$  мм,  $d_2 = 156,18$  мм,  $i_1 = 52^\circ 9'$ ,  $i_2 = 37^\circ 29'$ . Абберации этой схемы приведены в таблице 1. В таблице использованы следующие обозначения:  $y$  и  $z$  — высоты луча на поверхности решетки,  $y'$  и  $z'$  — абберации в меридиональной и сагиттальной плоскости, соответственно,  $y'$  — координата в плоскости регистрации спектра луча, дифрагированного в вершине решетки.

Расчет аппаратных функций (АФ) проведен с шагом 0,02 мм для ширины входной щели 0,10 мм. Предел разрешения, определяемый как ширина АФ на половине ее высоты, составил для центра поля 0,14 мм, для краев 0,30 мм и 0,28 мм, для длин волн 412,5 нм и 737,5 нм — 0,10 мм. Спектральное разрешение данной оптической схемы, определяемое как  $\delta \times d\lambda/dl$ , для длин волн 575 нм, 250 нм, 900 нм, составило 3,2 нм, 6,8 нм, 6,3 нм, соответственно, для 412,5 нм и 737,5 нм — 2,3 нм.

Из таблицы 1 видно, что качество изображения в этом случае определяется дефокусировкой, устранить которую можно установив вблизи поверхности регистрации вогнутоплоскую цилиндрическую кварцевую линзу [2]. Например, возможна установка линзы вместо защитного стекла диодной линейки. Плосковогнутая линза вносит дополнительную дисперсию, поэтому

Таблица 1. Абберации варианта 1 на плоской поверхности

$y$	$M$	575 нм, $y' = -0,154$ мм		250 нм, $y' = -13,851$ мм		900 нм, $y' = 14,415$ мм		412,5 нм, $y' = -6,942$ мм		737,5 нм, $y' = 7,080$ мм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
15	0	0,075	0	-0,183	0	-0,231	0	0,018	0	-0,008	0
7,5	0	0,039	0	-0,092	0	-0,102	0	0,008	0	0,002	0
-7,5	0	-0,038	0	0,095	0	0,077	0	-0,003	0	-0,012	0
-15	0	-0,073	0	0,196	0	0,128	0	0,002	0	-0,031	0
0	7,5	-0,001	0,040	0,003	-0,185	-0,005	0,273	0	-0,072	-0,003	0,155
0	15	-0,005	0,079	0,001	-0,370	-0,019	0,544	0	-0,145	-0,011	0,308

Таблица 2. Аберрации варианта 1 на плоской поверхности с корректирующей линзой

$m$	$M$	575 нм, $y' = 0$ мм		250 нм, $y' = -13,608$ мм		900 нм, $y' = 14,058$ мм		412,5 нм, $y' = -6,625$ мм		737,5 нм, $y' = 6,736$ мм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
15	0	0,007	0	-0,025	0	-0,019	0	-0,004	0	-0,013	0
10,5	0	0,007	0	-0,012	0	-0,010	0	-0,001	0	-0,005	0
-10,5	0	-0,008	0	-0,011	0	-0,003	0	0,002	0	-0,004	0
-15	0	-0,009	0	-0,022	0	-0,009	0	0,006	0	-0,008	0
0	10,5	-0,001	-0,072	-0,005	-0,190	-0,004	0,261	-0,001	-0,159	-0,002	0,069
0	15	-0,002	-0,103	-0,011	-0,271	-0,009	0,373	-0,003	-0,226	-0,004	0,098

Таблица 3. Аберрации варианта 1 на цилиндрической поверхности

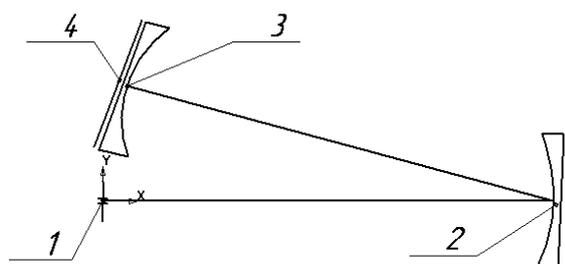
$m$	$M$	575 нм, $y' = 0$ мм		250 нм, $y' = -13,689$ мм		900 нм, $y' = 14,225$ мм		412,5 нм, $y' = -6,950$ мм		737,5 нм, $y' = 7,086$ мм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
15	0	-0,005	0	0,001	0	-0,044	0	0,002	0	-0,021	0
7	0	-0,001	0	-0,002	0	-0,008	0	0	0	-0,003	0
-7	0	0	0	0,007	0	-0,012	0	0,004	0	-0,005	0
-15	0	0,003	0	0,023	0	-0,050	0	0,017	0	-0,019	0
0	7	-0,001	0	0	-0,088	-0,005	0,343	0	-0,075	-0,002	0,138
0	15	-0,003	-0,001	0	-0,190	-0,025	0,733	0	-0,161	-0,010	0,295

частота штрихов дифракционной решетки была уменьшена. Принципиальная оптическая схема с корректирующей линзой приведена на рисунке 1.

Оптическая схема с корректирующей линзой имеет следующие конструктивные параметры:  $d = 100,8$  мм,  $N = 381$  штр./мм,  $\varphi = -2^\circ$ , расстояние от вершины решетки до линзы 100,2 мм, радиус кривизны цилиндрической линзы 25 мм, толщина по оси 1 мм, расстояние от линзы до плоскости регистрации 0,4 мм, обратная линейная дисперсия 23,5 нм/мм. Параметры записи:  $d_1 = 192,47$  мм,  $d_2 = 144,6$  мм,  $i_1 = 55^\circ 15'$ ,  $i_2 = 40^\circ 48'$ . Аберрации этой схемы приведены в таблице 2.

При расчете АФ с шагом равным 0,003 мм для ширины входной щели 0,015 мм предел разрешения составил 0,015 мм для всего спектрального диапазона, что соответствует спектральному разрешению 0,35 нм.

Таким образом, установка корректирующей линзы позволила улучшить спектральное разрешение более чем на порядок.



1 — входная щель; 2 — голограммная дифракционная решетка;  
3 — вогнуто-плоская цилиндрическая линза; 4 — плоскость регистрации спектра

Рис. 1. Принципиальная схема установки с корректирующей линзой

В настоящее время активно ведутся работы по разработке новых типов многоканальных приемников излучения, имеющих вогнутые поверхности регистрации [3]. Аберрации описанной выше голограммной решетки с  $N = 410$  штр./мм на цилиндрической поверхности регистрации с радиусом 55 мм приведены в таблице 3. Предел разрешения составил 0,01 мм (0,23 нм) для длин волн 250 нм, 575 нм и 412,5 нм. Однако на длинноволновом крае спектрального диапазона наблюдается падение разрешения из-за большого значения меридиональной комы — для 737,5 нм предел разрешения 0,02 мм (0,46 нм), для 900 нм — 0,035 мм (0,8 нм).

Второй рассмотренный нами вариант — голограммная решетка с коррекцией меридиональной комы для длин волн 412,5 нм и 737,5 нм. Для различных расстояний от щели до центра решетки  $d$  при  $\varphi = -2^\circ$  из условия минимизации дефокусировки определялись значения  $H_1$  и  $d'_{cp}$ . Затем определялись значения коэффициентов  $H_2$  и  $H_3$ , удовлетворяющие условиям равенства нулю меридиональной комы и астигматизма для 412,5 нм и 737,5 нм. Расчеты показали, что для голограммной дифракционной решетки с  $N = 370$  штр./мм при  $d = 90,995$  мм и  $d'_{cp} = 112,906$  мм меридиональная кома для 412,5 нм и 737,5 нм равна нулю. Коррекции астигматизма, так же как и для схемы с  $\varphi = 20^\circ$  достичь не удастся. При определении параметров голографирования значение  $H_1$  определялось из условия минимизации дефокусировки на плоскости, значение  $H_2$  соответствует равенству нулю астигматизма для 737,5 нм, а  $H_3$  найдено из условия равенства нулю меридиональной комы для 412,5 нм и 737,5 нм. Параметры записи имеют следующие значения:  $d_1 = 254,861$  мм,  $d_2 = 217,306$  мм,

Таблица 4 Аберрации варианта 2 на плоской поверхности

<i>m</i>	<i>M</i>	575 нм, <i>y'</i> = -0,061 мм		250 нм, <i>y'</i> = -13,867 мм		900 нм, <i>y'</i> = 14,334 мм		412,5 нм, <i>y'</i> = -6,949 мм		737,5 нм, <i>y'</i> = 7,063 мм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
15	0	0,029	0	-0,182	0	-0,182	0	-0,022	0	-0,024	0
7,5	0	0,016	0	-0,087	0	-0,088	0	-0,009	0	-0,011	0
-7,5	0	-0,014	0	0,081	0	0,083	0	0,009	0	0,011	0
-15	0	-0,023	0	0,159	0	0,164	0	0,021	0	0,024	0
0	7,5	0	-0,067	-0,001	-0,191	0	0,076	-0,001	-0,131	0	0,002
0	15	-0,001	-0,139	-0,004	-0,386	0,002	0,144	-0,003	-0,266	0	-0,003

Таблица 5. Аберрации варианта 2 на плоской поверхности с корректирующей линзой

<i>m</i>	<i>M</i>	575 нм, <i>y'</i> = -0,003 мм		250 нм, <i>y'</i> = -13,596 мм		900 нм, <i>y'</i> = -13,976 мм		412,5 нм, <i>y'</i> = -6,649 мм		737,5 нм, <i>y'</i> = -6,75 мм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
15	0	-0,001	0	-0,035	0	-0,006	0	-0,015	0	-0,008	0
10,5	0	0,001	0	-0,018	0	-0,007	0	-0,008	0	-0,006	0
-10,5	0	0,002	0	-0,013	0	0,021	0	0,003	0	0,011	0
-15	0	0,006	0	-0,027	0	0,034	0	0,005	0	0,019	0
0	10,5	-0,001	-0,119	-0,007	-0,175	0,002	0,134	-0,003	-0,172	0	-0,016
0	15	-0,001	-0,173	-0,014	-0,252	0,003	0,186	-0,005	-0,249	0,001	-0,027

Таблица 6. Аберрации варианта 2 на цилиндрической поверхности

<i>m</i>	<i>M</i>	575 нм, <i>y'</i> = 0 мм		250 нм, <i>y'</i> = -13,718 мм		900 нм, <i>y'</i> = 14,157 мм		412,5 нм, <i>y'</i> = -6,942 мм		737,5 нм, <i>y'</i> = 7,052 мм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
15	0	-0,002	0	-0,009	0	-0,010	0	-0,003	0	-0,004	0
7	0	0	0	-0,001	0	-0,002	0	0	0	-0,001	0
-7	0	0,001	0	-0,002	0	-0,002	0	0	0	0,001	0
-15	0	0,007	0	-0,004	0	-0,004	0	0,003	0	0,005	0
0	7	0	-0,077	-0,001	-0,099	-0,001	0,154	-0,001	-0,113	0	0,011
0	15	-0,001	-0,171	-0,006	-0,215	-0,003	0,321	-0,003	-0,247	0	0,017

$i_1 = 33^\circ 34'$ ,  $i_2 = 22^\circ 55'$ . В таблице 4 приводятся аберрации оптической схемы на плоской поверхности при коррекции комы ( $d'_{cp} = 112,6$  мм).

Расчет аппаратных функций проведен с шагом равным 0,02 мм для ширины входной щели 0,10 мм. Предел разрешения составил для центра поля и для точек коррекции меридиональной комы 0,10 мм, для краев спектрального диапазона 0,28 мм. Спектральное разрешение для центра поля и для точек коррекции меридиональной комы составило 2,3 нм, для краев спектрального диапазона 6,4 нм. Сравнивая результаты расчета двух вариантов, видим, что в схеме с коррекцией меридиональной комы несколько лучше разрешение в центре спектрального диапазона.

После введения в оптическую схему этого варианта вогнутоплоской цилиндрической кварцевой линзы имеем систему со следующими параметрами:  $d = 91,85$  мм,  $d' = 110,4$  мм,  $N = 350$  штр./мм,  $\varphi = -2^\circ$ , радиус кривизны цилиндрической линзы  $R = 28$  мм. При расчете параметров голографирования было использовано значение  $H_2$  соответствующее коррекции астигматизма на длине волны 737,5 нм, что обеспечило

более симметричные значения астигматизма по всему рабочему спектральному диапазону. Параметры записи имеют следующие значения:  $d_1 = 258,0$  мм,  $d_2 = 219,588$  мм,  $i_1 = 34^\circ 21'$ ,  $i_2 = 24^\circ 11'$ . Аберрации варианта 2 с корректирующей линзой приведены в таблице 5.

Расчет аппаратных функций показал, что предел разрешения для центра поля и для длины волны 412,5 нм составил 0,015 мм (0,35 нм), во всем диапазоне не хуже 0,018 мм (0,42 нм), что практически совпадает с результатами варианта 1.

Аберрации голограммной решетки этого варианта с  $N = 370$  штр./мм на цилиндрической поверхности регистрации с радиусом 64 мм приведены в таблице 6. Сравнивая эти результаты с результатами, приведенными в таблице 3, видим, что аберрации на краю спектрального диапазона значительно уменьшились.

Более высокое качество изображения в этой схеме подтверждает и расчет АФ. Предел разрешения составил 0,01 мм по всему полю, что соответствует спектральному разрешению 0,23 нм. По сравнению с вариантом 1 разрешение на краю спектрального диапазона улучшилось в три раза.

Следует отметить, что во всех рассмотренных схемах варианта 2 максимальное значение астигматического удлинения изображения входной щели не превышает 0,321 мм. Значения астигматического удлинения изображения входной щели варианта 1 могут быть также уменьшены, если при определении параметров решеток использовать значение коэффициента голографирования  $H_2$ , соответствующее коррекции астигматизма на длине волны 737,5 нм.

Для оптической схемы с  $\varphi = 20^\circ$  с коррекцией комы [1] спектральный предел разрешения для центра поля составлял 0,41 нм, для краев 0,61 нм и 0,75 нм, для точек коррекции меридиональной комы 0,34 нм и 0,54 нм, а астигматическое удлинение изображения входной щели достигало 1,772 мм. Падение разрешения

в этой схеме вызывала значительная сагиттальная кома, которая имеет весьма малые значения во всех рассмотренных установках.

Таким образом, проведенное исследование позволило сделать вывод, что установка с  $\varphi = -2^\circ$  позволяет получить значительно лучшее качество спектра, чем установка с  $\varphi = 20^\circ$ . Расчеты, проведенные для установки с  $\varphi = -2^\circ$ , показали, что при работе с широкими щелями (равными или превышающими 0,1 мм) возможно использование голограммной решетки с плоским полем с произвольным выбором положения входной щели. Однако при регистрации спектра на цилиндрической поверхности целесообразнее использовать установку с коррекцией комы, позволяющую получить большее разрешение.

#### Список литературы

- [1] **Ахметгалеева, Р. Р.** / Р. Р. Ахметгалеева Н. К. Павлычева // Голография. Наука и практика: 13-я междунар. конф. «ГолоЭкспо 2016», 12–15 сентября 2016 г., Ярославль, Россия: Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 413 с.
- [2] **Nazmееv, M. N.** New generation spectrographs / M. N. Nazmееv, N. K. Pavlycheva // Optics Engineering. — 1994. — Vol. 33. — № 8. — P. 2777.
- [3] **Delphine Dumas** Curved focal plane detector array for wide field cameras / Manuel Fendler, Nicolas Baier, Jérôme Primot, Etienne le Coarer // Applied Optics. — Vol. 51. — No. 22. — 1 August 2012. — P. 5419–5424.

### A study of correction features concave holographic grating for a compact spectrofluorometer

*N. K. Pavlycheva, R. R. Akhmetgaleeva*

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

The report presents the results of a study of the corrective capabilities of a concave hologram diffraction grating in a compact spectrofluorimeter scheme having a spectral working range of 250–900 nm, a curvature radius of 100 mm, a beam angle of  $-2^\circ$ , an inverse linear dispersion of 23 nm/mm, a relative aperture 1:3.3. Two options are considered: 1 — an optical scheme having approximately the same distances from the entrance slit to the top of the diffraction grating and from the top of the grating to the spectrum registration plane; 2 — an optical scheme with correction of meridional coma for wavelengths 412.5 nm 737.5 nm. For each option, three settings are considered — with the registration of the spectrum on the plane, with the correcting lens and recording the spectrum on the plane, with the registration of the spectrum on the cylindrical surface. It is shown that when working with wide slits (equal to or exceeding 0.1 mm) it is possible to use a hologram grating with a flat field with an arbitrary choice of the position of the entrance slit. However, when registering the spectrum on a cylindrical surface, it is advisable to use a coma correcting device, which allows obtaining a higher resolution.

#### 4.4. Экспериментальное исследование характеристик модулятора лазерного излучения с применением схемы из двух фазовых прямоугольных дифракционных решеток

В. А. Косоцкий, Ю. М. Соколов, Н. В. Суетин  
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

##### Введение

При проведении физических экспериментов находят применение простые механические модуляторы лазерного излучения, которые периодически прерывают лазерный пучок. Для этого используется вращающийся непрозрачный диск с отверстиями или с прорезями. Однако при этом частота модуляции невысока, и составляет порядка нескольких кГц. Кроме того, при пересечении лазерным пучком границы отверстия возникают дифракционные эффекты, искажающие форму выходного пучка.

В этом докладе мы представляем результаты исследования схемы устройства, в котором модуляция лазерного пучка происходит в результате последовательной дифракции оптического пучка на двух фазовых дифракционных решетках, одна из которых движется в направлении поперёк штрихов решетки. В данном устройстве применены специфические дифракционные решетки, образованные рельефом с прямоугольной формой типа «меандр» на прозрачной подложке.

Применение данной схемы позволит повысить частоту модуляции лазерного пучка до величин более 100 кГц и избежать искажений дифракционной картины выходного пучка. Рассматривается 2 варианта схемы. В первом варианте выходной модулированный пучок формируется в первом порядке дифракции. При этом оказывается возможным получить модуляцию мощности выходного пучка по гармоническому закону с эффективностью модуляции до 40 %. Во втором варианте выходной пучок формируется в нулевом порядке дифракции, при этом можно получить модуляцию в форме периодических импульсов специфической формы с пиковой мощностью, близкой к мощности излучения на входе схемы (80–90 %).

Схема модулятора, изображенная на рисунке 1, включает лазер 7, модулирующий блок и пространственный фильтр 5. Модулирующий блок состоит из двух прозрачных дисков 1 и 3. На поверхностях дисков нанесены идентичные круговые рельефные фазовые дифракционные решетки (ДР) 2 и 4 с одинаковым периодом  $\Lambda$ , которые расположены по периферии дисков

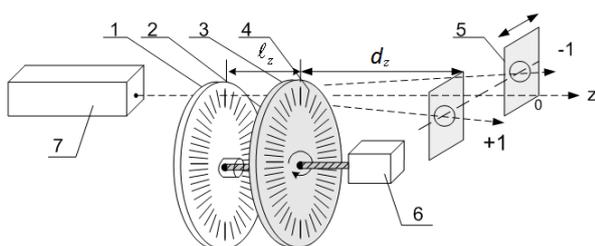


Рис. 1. Схема модулятора с двумя ДР в качестве модулирующего блока

на расстояниях  $R_G$  от центров дисков. Линии решеток направлены радиально. Диски расположены в параллельных плоскостях на одной осевой линии, на небольшом удалении друг от друга. Расстояние  $l_z$  между ДР, которые находятся на поверхностях дисков, обращенных друг к другу, должно удовлетворять условию:  $l_z \ll \Lambda^2/\lambda$ . Один из дисков вращается двигателем 6 относительно второго диска, делая  $n$  оборотов в секунду.

Рельеф имеет специфическую форму типа «меандр», у которой ширина выступов равна ширине впадин. Линии, образующие рельеф ДР, расположены по радиальным направлениям к центру диска. Оптимальная глубина рельефа ДР, при которой модуляция в нулевом и первых порядках имеет максимальную амплитуду, рассчитывается по формуле:

$$h_{opt} = \frac{\lambda}{4(n_g - 1)}, \quad (1)$$

где  $n_g$  — показатель преломления вещества, из которого изготовлен рельеф. При таком значении глубины рельефа глубина фазовой модуляции волнового фронта составит  $\Delta\varphi = \pi/2$ , а амплитуда пространственной фазовой модуляции (ПФМ) составит  $\Phi_M = \Delta\varphi/2 = \pi/4$ .

Модель дифракции оптической волны на системе из двух дифракционных решеток (рисунок 2), была рассмотрена в [1]. Анализ показал, что при последовательной дифракции лазерного пучка на двух ДР, которые разделены участком свободного пространства, мощность излучения в порядках дифракции зависит от следующих параметров: от расстояния между ДР, от смещения одной из ДР относительно второй в направлении  $Ox$ , от амплитуды и формы ПФМ, которую получает оптическая волна при проходе через каждую из решеток.

Особый интерес при создании модулятора представляют рельефные фазовые ДР с профилем рельефа

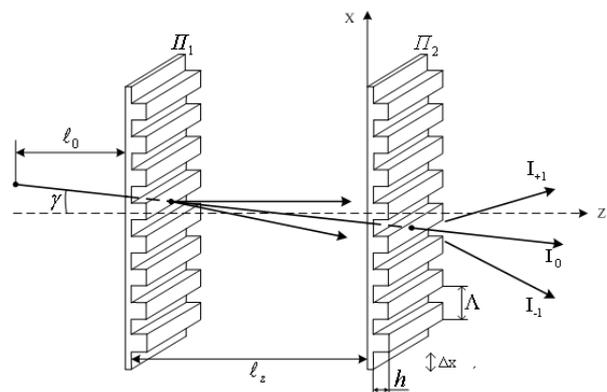


Рис. 2. Схема прохождения оптической волны через систему из двух ДР

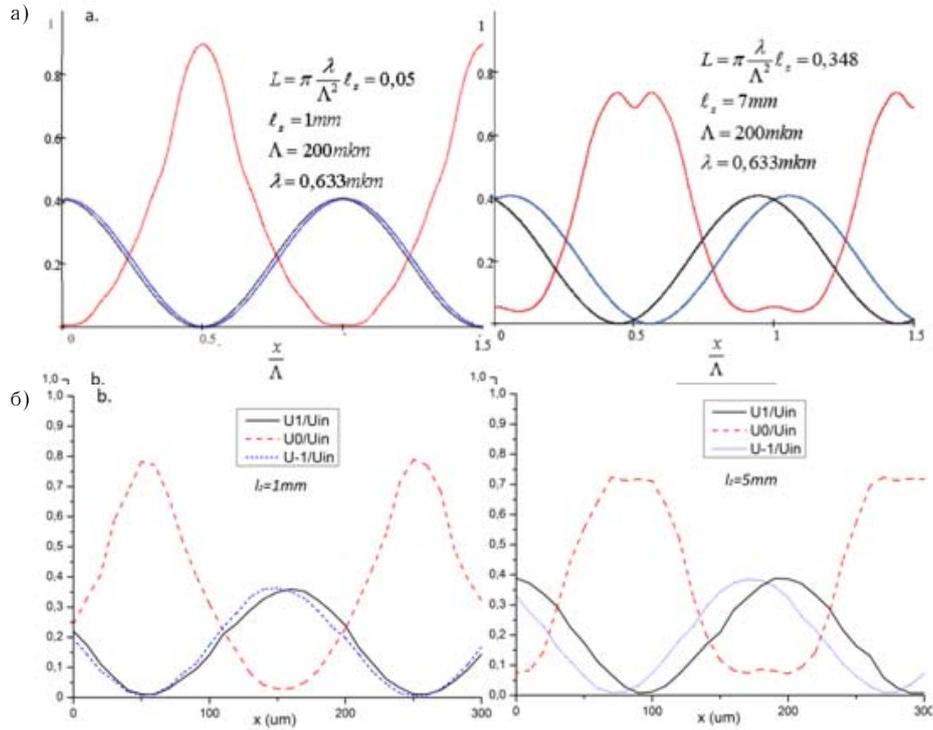


Рис. 3. Расчетные (а) и экспериментальные (б) зависимости мощности в нулевом и первом порядках дифракции от смещения  $P_0(x)$  при различных значениях параметра расстояния  $L$

в форме меандра, поскольку в дифракционных пространственных спектрах этих ДР отсутствуют четные дифракционные порядки. Только при этом условии в первых порядках дифракции при движении одной из ДР относительно другой ДР колебания мощности происходят по гармоническому закону. При этом колебания мощности в нулевом порядке не будут чисто гармоническими. При оптимальной глубине решеток  $h_{\text{Opt}}$ , которая определяется формулой (1), наблюдается наибольшая эффективность модуляции. При глубине решеток  $h_{\text{Opt}}$ , и при нормальном падении лазерного пучка на ДР зависимости коэффициента интенсивности в первых

порядках дифракции от смещения ДР поперёк линий решётки имеют следующий вид [1]:

$$I_{\pm 1}(x) = \frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi^2} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x \mp L\right), \quad (2)$$

где  $L = \pi \frac{\lambda}{\Lambda^2} l_z$  — параметр расстояния (distance parameter).

Коэффициент интенсивности излучения в нулевом порядке дифракции описывается более сложной формулой, содержащей бесконечные ряды гармоник:

$$I_0 = \frac{1}{3} - \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\cos[(2k+1)^2 L]}{(2k+1)^2} \cos\left[(2k+1) \frac{2\pi}{\Lambda} x\right] + \frac{8}{\pi^4} \sum_{k=0}^{+\infty} \sum_{k'=0}^{+\infty} \frac{\cos[4(k^2 - k'^2 + k - k')L]}{(2k+1)^2 (2k'+1)^2} \cos\left[2(k' - k) \frac{2\pi}{\Lambda} x\right] + \frac{8}{\pi^4} \sum_{k=0}^{+\infty} \sum_{j=0}^{+\infty} \frac{\cos\left[2(k+j+1) \frac{2\pi}{\Lambda} x + 4(j^2 - k^2 + j - k)L\right]}{(2k+1)^2 (2j+1)^2}, k \neq k'. \quad (3)$$

Мощность излучения в порядке дифракции с номером  $n$  ( $n = 0, 1, -1$ ) связана с коэффициентом интенсивности и мощностью излучения на входе схемы  $P_{\text{In}}$  соотношением:

$$P_n = \eta I_n P_{\text{In}}, \quad (4)$$

где  $\eta$  — коэффициент полезного использования мощности с учетом потерь излучения в оптической схеме на отражение и поглощение.

Как следует из формулы (2), мощность в первом порядке дифракции изменяется по гармоническому закону в пределах от нулевого до максимального значения, равного:  $P_{1\text{max}} = (4/\pi^2) \eta P_{\text{In}}$ . Зависимость интен-

сивности в нулевом порядке дифракции периодическая, с периодом  $\Lambda$ . Форма зависимости сложным образом изменяется при изменении параметра расстояния  $L$  и ни при каких условиях не является гармонической функцией. При этом амплитуда модуляции мощности пучка нулевого порядка на практике может достигать величины  $P_{0\text{max}} = 0,9 \eta P_{\text{In}}$  при значении параметра  $L = 0,05$ . Зависимости мощностей в дифракционных порядках, рассчитанные по формулам (2) и (3) представлены на рисунке 3а.

Графики зависимостей, полученных экспериментальным путём на макете, составленном из двух ДР при моделировании схемы в квазистатическом режиме

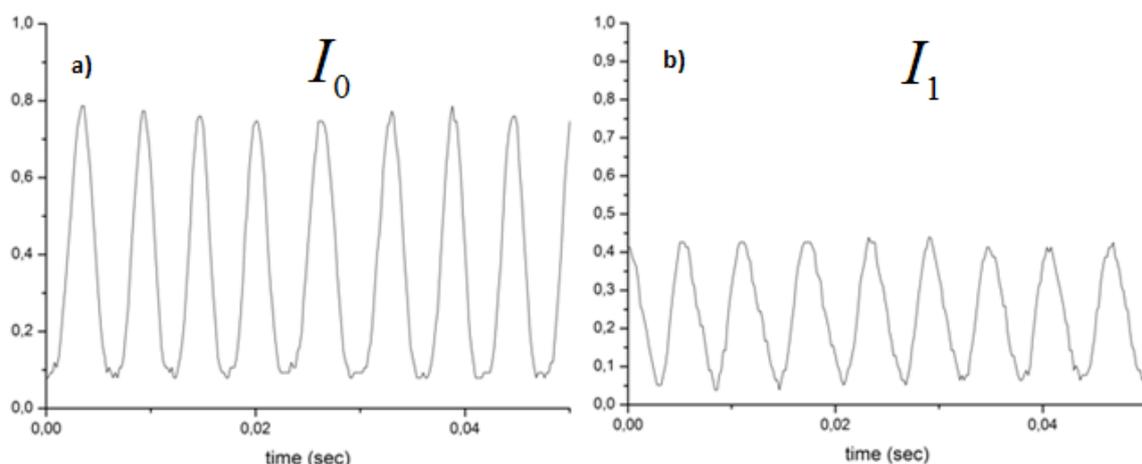


Рис. 4. Экспериментальные модуляционные характеристики в нулевом (а) и первом (б) дифракционных порядках.  
 $n = 0,15$  об/с,  $F = 190$  Гц

представлены на рисунке 3б. Для исследования зависимости интенсивностей в порядках дифракции от смещения одной из ДР были изготовлены фазовые решетки с прямоугольным профилем с глубиной рельефа, близкой к оптимальной, и периодом  $\Lambda = 200$  мкм. Одна из решеток — стационарная, а вторая решетка — подвижная, была установлена параллельно первой на подвижной платформе, которая приводилась в движение микрометрическим винтом в плоскости решетки в направлении поперёк штрихов решетки. Шаг смещения составлял 10 мкм. Кроме того, платформа позволяла изменять расстояние между двумя ДР. В качестве источника когерентного излучения в этом и следующем эксперименте использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны  $\lambda = 0,63$  мкм. Мощность в порядках дифракции измерялась с помощью фотодиода.

Как видно из графиков на рисунках 3а и 3б, экспериментальные графики соответствуют расчётным зависимостям. При движении одной из решеток с постоянной скоростью в направлении оси  $Ox$  будет наблюдаться периодическая модуляция мощности дифракционных порядков во времени. При этом форма колебаний мощности в первых порядках дифракции будет гармонической. В нулевом порядке дифракции колебания мощности — периодические, в виде импульсов специфической формы с амплитудой колебаний порядка  $(0,8-0,9)\eta P_{in}$ . Кроме того, можно заметить, что разность фаз гармонических колебаний мощности в первом и минус первом порядках дифракции зависит от расстояния между решетками.

Результаты исследования модулятора в динамическом режиме. Для моделирования работы устройства в динамическом режиме был изготовлен макет по схеме, изображенной на рисунке 1. При проведении экспериментов использовался сектор диска с круговой решеткой, который был изготовлен с использованием технологий фотолитографии и химического травления стекла. Период ДР, измеренный на расстоянии 30 мм от центра диска, составлял 150 мкм. Амплитуда ПФМ решеток определялась по методике, описанной в [2] по

измеренному соотношению мощностей нулевого и первых дифракционных порядков. На практике измеренные величины лежали в диапазоне  $\Phi_M = 42^\circ-43^\circ$ , что очень близко к оптимальной величине  $\Phi_M = 45^\circ$ . Неподвижная решетка закреплена на пути лазерного пучка, подвижная — установлена в отверстии на поверхности диска. Диск приводился во вращение двигателем постоянного тока. Решетки были установлены параллельно на расстоянии порядка 1 мм. Была предусмотрена возможность смещения неподвижной решетки с целью обеспечения параллельности штрихов решеток. В порядках дифракции были установлены фотодиоды с резисторами нагрузки, включённые в режиме обратного смещения. При этом напряжение на резисторе нагрузки пропорционально мощности падающего на фотодиод излучения. Форму выходного сигнала регистрировали с помощью осциллографа с функцией записи сигнала. Полученные модуляционные характеристики представлены на рисунке 4. Зависимость нормирована на напряжение резистора нагрузки фотодиода, которое было измерено при прямом падении лазерного пучка на фотодиод с учетом потерь на отражение от 4 границ стекло—воздух (15 %). Модуляционная картина очень близка к расчетной.

При вращении диска линейная скорость смещения подвижной решетки относительно неподвижной составляет  $v = 2\pi Rn$ . Частота колебаний при этом равна  $F = v/\Lambda = 2\pi Rn/\Lambda$ . Для  $R = 30$  мм,  $n = 0,15$  об/с и  $\Lambda = 150$  мкм получаем:  $F = 188$  Гц, что соответствует экспериментальной величине частоты модуляции. При увеличении скорости вращения диска до 100 об/с при тех же параметрах решетки, частота модуляции составит величину  $F = 125$  кГц.

Другой вариант исполнения устройства, работающего на том же принципе, приведен на рисунке 5. В этом случае подвижная решетка 1 представляет собой бесконечную прозрачную ленту с нанесенной на ленте ДР в форме меандра. Неподвижная решетка 2 закреплена на пути пучка лазера 5 в плоскости, параллельной плоскости ленты. Штрихи решеток совпадают. Лента

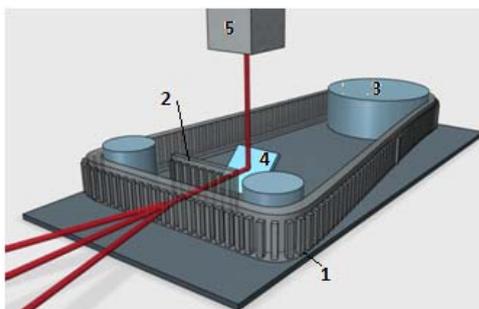


Рис. 5. Схема модулятора с двумя ДР в качестве модулирующего блока с бесконечной лентой в качестве подвижной решетки

закреплена в лентопротяжном механизме 3. Для направления лазерного пучка используется вспомогательное зеркало 4. В этой схеме смещение решеток

происходит в результате движения ленты в лентопротяжном механизме. При  $v = 15$  м/с и  $\Lambda = 150$  мкм  $F = 100$  кГц.

### Выводы

Приведены результаты теоретического анализа взаимодействия лазерного пучка с системой из двух ДР. Показана возможность осуществления модуляции с частотами модуляции порядка сотен кГц путем смещения одной из ДР в плоскости, параллельной штрихам решетки. Проведены экспериментальные исследования характеристик модулятора лазерного излучения с применением схемы с двумя ДР. При использовании решеток с оптимальной глубиной ПФМ можно получить гармоническую модуляцию мощности пучка первого порядка дифракции с максимальной амплитудой модуляции  $P_{1\max} = (4/\pi^2)\eta P_{\text{in}}$ , а в нулевом порядке дифракции периодическую модуляцию мощности пучка с амплитудой до  $P_{0\max} = 0,9\eta P_{\text{in}}$ .

### Литература

- [1] **Комоцкий, В. А.** Анализ интенсивностей дифракционных порядков в оптической схеме, содержащей две фазовые дифракционные решетки / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов, А. Н. Алексеев, Е. В. Басистый // Вестник РУДН. Серия Физико-математические науки. — 2006. — № 1. — С. 90–95.
- [2] **Кашенко, Н. М.** Измерение глубины периодической структуры типа меандра методом лазерного зондирования / Н. М. Кашенко, В. А. Комоцкий, М. А. Кузнецов // Вестник РУДН. Серия Физика. — 2001. — Том 1. — № 9. — С. 101–103
- [3] **Комоцкий, В. А.** Метод измерения глубины периодических рельефных отражателей акустических волн лазерным зондированием. / Соколов Ю.М., Басистый Е.В. // Р. Э. — 2011. — Том 56. — № 2. — С. 243–248.
- [4] **Кашенко, Н. М.** Определение глубины опорных дифракционных решеток на основе измерения и анализа интенсивностей дифракционных порядков / Н. М. Кашенко, В. А. Комоцкий // Вестник РУДН. Серия Физика. — 1999. — Том 1. — № 7. — С. 16–27.

## Experimental study of the characteristics of laser radiation modulator using two-phase rectangular diffraction grating

*V. A. Komotsky, Y. M. Sokolov, N. V. Syetin*  
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

A new type of device for periodical modulation of laser radiation is considered. The modulating unit consists of two phase diffraction gratings with a rectangular profile, one of which is being moved relative to the other one. Dependences of power radiation in the diffraction orders on the parameters of the optic scheme are presented. The results of experimental studies of modulation characteristics are given. The device allows obtain modulation frequencies up to hundreds of kHz.

#### 4.5. Формирование и свойства элементов на основе периодических структур и элементов с произвольной формой поверхности в фотополимерах голографическими методами

*Н. Д. Ворзобова, В. О. Веселов, П. П. Соколов*

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены особенности процессов формирования периодических структур в фотополимерных материалах и свойства элементов на их основе. Предложен голографический метод получения элементов с произвольной трехмерной формой поверхности.

**Ключевые слова:** Голография, Голографические оптические элементы, Фотополимеры.

В настоящее время существует большое разнообразие методов и материалов, используемых для получения элементов периодической и трехмерной конфигурации. В данной работе рассмотрены методы, имеющие преимущества относительной простоты процессов формирования элементов и низкой стоимости материалов.

Рассмотрены основные эффекты, определяющие процессы формирования структур в фотополимерах в периодическом световом поле. Выявлена определяющая роль диффузионных процессов кислородного ингибирования полимеризации при низких пространственных частотах записи, приводящих к уменьшению размеров элементов структур относительно наложенной световой области, а также процессов массопереноса [1, 2] для больших частот, определяющих модуляцию показателя преломления. Определены условия получения дифракционной эффективности до 80 %. Показана возможность получения дифракционных элементов, светоделителей, расщепителей пучков, а также защитных элементов на основе объемных пропускающих решеток.

Рассмотрены особенности получения структур в слоях с большой толщиной (более 100 мкм) и возможность получения светорассеивателей с однонаправленной индикатрисой.

Исследованы процессы формирования гибридных структур [3] — объемных решеток с модуляцией показателя преломления, на поверхности которых формируются рельефные решетки. Определены условия, при которых на поверхности объемной решетки с высокой

дифракционной эффективностью может формироваться решетка со значительным поверхностным рельефом. Показано, что формирование рельефной решетки на поверхности объемной решетки с модуляцией показателя преломления приводит к изменению селективных свойств: существенному уширению контура угловой селективности. Установлено, что вклад решетки поверхностного рельефа в дифракционную эффективность гибридной структуры наиболее сильно выражен на начальном этапе формирования структуры. Определены условия получения гибридной структуры с ДЭ 80 % при падении излучения под углом Брэгга и до 45 % при отклонении более чем на 500. Предложено возможное практическое применение элементов на основе гибридных структур в защитных технологиях и солнечной энергетике. По ряду параметров полученные элементы имеют преимущества, относительно рассматриваемых в работах [4, 5].

Предложен способ получения трехмерных элементов, основанный на проекции изображения, восстановленного голограммой, в объем фотополимерного материала. Рассмотрены проблемы, связанные с ограничением глубины полимеризации. Определены условия ограничения глубины отверждения. Приведены результаты экспериментов, показавших возможность получения элементов с произвольной формой поверхности. Предложенный способ имеет преимущества упрощения процесса и увеличения скорости получения элементов по сравнению с известными технологиями 3D печати, основанными на поточечном и послойном формировании.

#### Список источников

- [1] **Tomita, Y.** Photopolymerizable nanocomposite photonic materials and their holographic applications in light and neutronoptics / Y. Tomita, E. Hata, K. Momose, S. Takayama, X. Liu, K. Chikama, J. Klepp, C. Pruner, M. Fally // *Journal of Modern Optics*. — 2016. — № 63. — P. 520–530.
- [2] **Close, C. E.** Monomer diffusion rates in photopolymer material. Part I. Low spatial frequency holographic gratings / C. E. Close, M. R. Gleeson, J. T. Sheridan // *Journal of the Optical Society of America B*. — 2011. — Vol. 28. — № 4. — P. 658–666.
- [3] **Lucchetta, D. E.** Hybrid surface-relief/volume one dimensional holographic gratings / D. E. Lucchetta // *Optical Materials*. — 2015. — Vol. 42. — P. 366–369.
- [4] **Akbari, H.** Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications / H. Akbari, I. Naydenova, S. Martin // *Applies optics*. — 2014. — Vol. 53. — № 7. — P. 1343–1363.
- [5] **Jong, T.** Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators / T. Jong, D. Boer, C. Bastiaansen // *Optics Express*. — 2011. — Vol. 19. — № 16. — P. 15127–15142.

## **Formation and properties of elements on the basis of periodic structures and elements with an arbitrary surface shape in photopolymers by holographic methods**

*N. D. Vorzobova, V. O. Veselov, P. P. Sokolov*

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

The features of processes of periodic structures formation in photopolymer materials and properties of elements on their basis are considered. A holographic method for obtaining elements with an arbitrary three-dimensional surface shape is proposed.

**Keywords:** Holography, Holographic optical elements, Photopolymers.

#### 4.6. Моделирование и экспериментальное исследование разрушения сферической полистироловой микрочастицы в импульсном ультрафиолетовом лазерном пучке

В. С. Васильев<sup>1</sup>, Р. В. Скиданов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений Российской академии наук — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, Самара, Россия

Отражена модель нагрева полистироловой микрочастицы с условием, что функция источника задана в виде нагревающего конуса. Отображены эксперименты по микровзрывам полистироловых микрочастиц на кварцевой подложке и подложке, покрытой слоем алюминия, используя лазерное излучение с длиной волны 355 нм.

**Ключевые слова:** Микровзрывы, Ультрафиолетовый пучок света, Полистироловые микросферы, Скорость микрочастицы, Кварцевая подложка, Алюминиевая подложка.

##### Введение

Впервые идея о том, что свет определённым образом способен механически воздействовать на вещество появилась в средневековой астрономии. В начале 17-го века Иоганн Кеплер сделал предположение, что именно такая величина, как давление солнечного света заставляет отклоняться хвост видимой на небе кометы в сторону от Солнца. Далее Ньютон представил работы о телескопах и корпускулярную теорию света, которая была в пользу теории о существовании солнечного давления. В конце 19-го века Джеймс Клерк Максвелл, который был серьёзным математиком, знающим фундаментальные физические закономерности, произвёл расчёт светового давления на основе своей же электромагнитной теории света, а спустя пять лет Бартолли, исходя из термодинамических предположений, вычислил давление света. Таким образом, для пучка, имеющего плоский волновой фронт, падающего перпендикулярно на плоскую поверхность, давление света выражается следующей формулой:  $P = E(1 + r)/v$ , где  $E$  — количество падающей в секунду энергии;  $r$  — коэффициент отражения поверхности;  $v$  — скорость распространения световых лучей.

В настоящее время все работы по манипулированию идут в направлении уменьшения размеров перемещаемых объектов [1–3]. Существует огромное количество методов манипуляции микрочастицами, например, при помощи оптических ловушек [4]. Недостатком данного метода является то, что вращению поддаются в основном прозрачные микрочастицы, а для частиц больших размеров этот метод неприменим в связи с используемой мощностью лазера, благодаря которому объект перемещения можно повредить, либо полностью разрушить. Также существуют механические манипуляции, которые осуществляются при помощи механического микропинцета. Для манипулирования микрочастицами данный метод является неинвазивным. Для перемещения микрообъектов посредством взрыва или разрушения близлежащих объектов имеется возможность устранения проблемы частичного или полного разрушения микрообъекта перемещения

и так же устранения проблемы биологической мутации. Косвенным методом микроманипуляции имеется возможность перемещения микрообъекта в необходимом направлении и на заданное расстояние.

##### 1. Модель нагрева полистироловой микрочастицы с функцией источника, заданной в виде нагревающего конуса

###### 1.1. Теоретическая часть

Составляющая интенсивности, проходящая в слой полистироловой микрочастицы с учётом отражения на поверхности будет выражаться следующей формулой.

$$A = \left[ \frac{2 \cos \arctg \frac{r}{R}}{\cos \arctg \frac{r}{R} + \frac{n_2}{n_1} \cos \left( \arctg \frac{r}{R} \arcsin \frac{n_1}{n_2} \right)} \right]^2 I_1. \quad (1)$$

$$I_t = A \left[ \frac{n_2 \cos \left( \arctg \frac{r}{R} \arcsin \frac{n_1}{n_2} \right)}{n_1 \cos \arctg \frac{r}{R}} \right]^2, \quad (2)$$

где  $r$  — радиус лазерного пучка,  $R$  — радиус полистироловой микрочастицы,  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления воздуха и полистирола соответственно.

Далее связываем энергию в слое с изменением температуры в этом же слое.

$$\Delta T = \frac{k/S\Delta t}{c}, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент теплопроводности полистирола,  $c$  — теплоёмкость полистирола,  $S$  — площадь нагреваемой поверхности.

После переходим к уравнению теплопроводности в следующем виде.

$$\frac{\partial u}{\partial t} - a^2 \left[ \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \right] = f(r, \theta), \quad (4)$$

И переходим к явной разностной схеме.

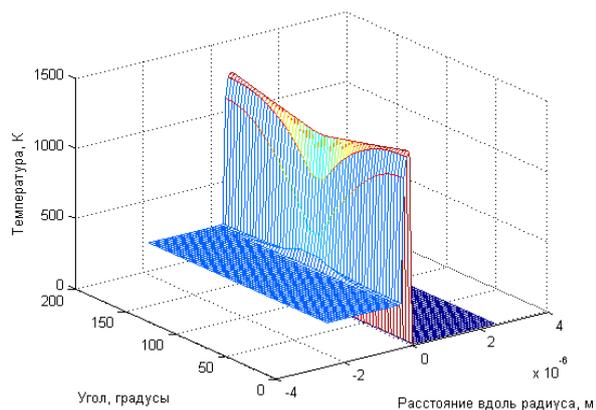


Рис. 1. Температура в зависимости от зенитного угла через импульс лазерного излучения

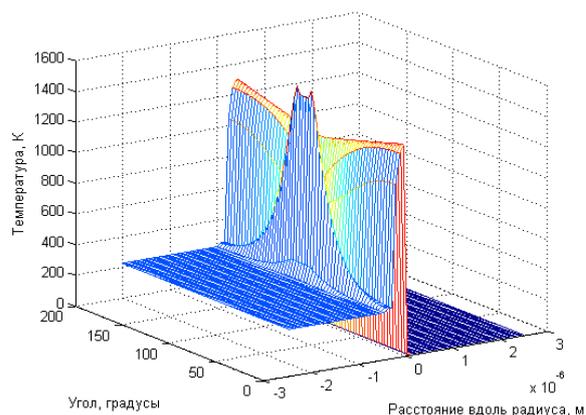


Рис. 3. Температура в зависимости от зенитного угла между импульсами лазерного излучения

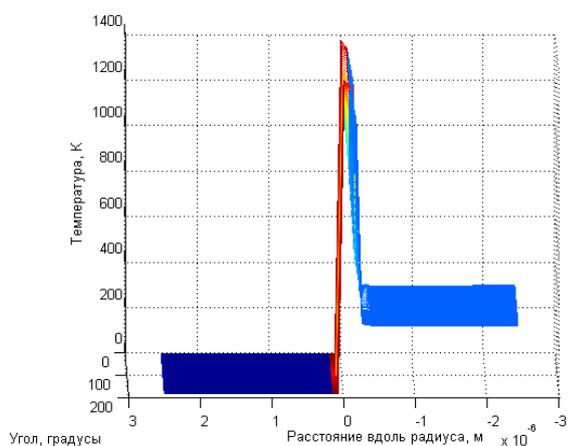


Рис. 2. Температура в зависимости от глубины проникновения света через импульс лазерного излучения

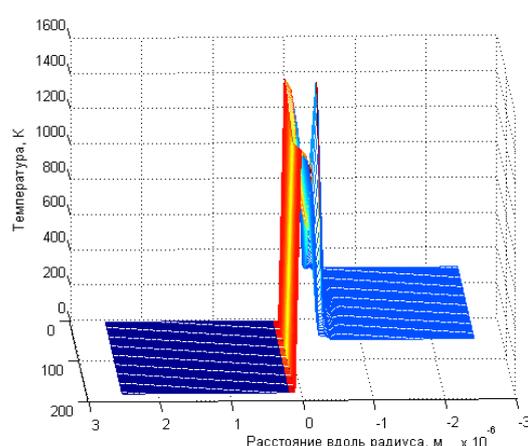


Рис. 4. Температура в зависимости от глубины проникновения между импульсами лазерного излучения

$$u_{i,j}^{k+1} = u_{i,j}^k + h_t f(r_i, \theta_j) + a^2 h_t \left( \frac{2 u_{i+1,j}^k - u_{i,j}^k}{r_i h_r} + \frac{u_{i+1,j}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i-1,j}^k}{h_r^2} + \frac{\text{ctg} \theta_j}{r_i^2} \frac{u_{i,j+1}^k - u_{i,j}^k}{h_\theta} + \frac{1}{r_i^2} \frac{u_{i,j+1}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i,j-1}^k}{h_\theta^2} \right) \quad (5)$$

Со следующими граничными и начальными условиями (где  $T_0$  – температура окружающей среды):

1)  $u_{i,j}^0 = T_0$ ;

2)  $\frac{\partial u}{\partial n} - \gamma(T_0 - u) = 0$ , где  $\gamma$  – коэффициент теплопередачи;

3) Для  $r = 0$ :  $3 \frac{u_{i+1,j}^k - u_{i,j}^k}{h_r} = 0$  (вводя упрощение,

что в центре микрочастицы всё происходит симметричным образом).

Далее будут приведены графики нагрева полистироловой микрочастицы в зависимости от зенитного угла и от глубины проникновения света в полистироловую микрочастицу на рисунках с 1-го по 4-ый.

## 1.2. Проверка наблюдаемого эффекта при помощи натурального эксперимента

В оптической схеме на рисунке 5 введены обозначения: UV-ультрафиолетовый лазер DTL-375 с длиной волны 355 нм и максимальной средней мощностью 40 мВт;  $M_1, M_2, M_3$  – поворотные зеркала; I – лампа

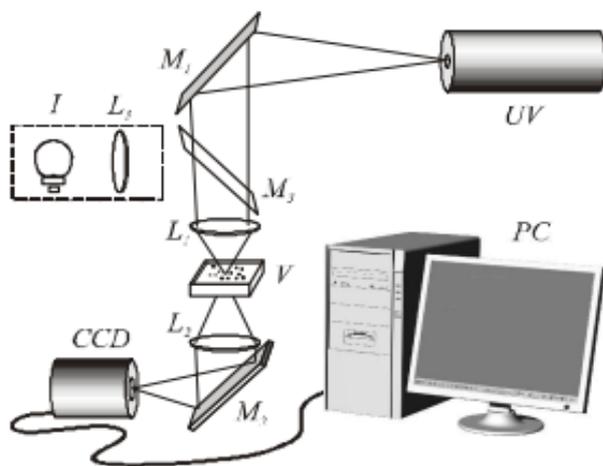


Рис. 5. Оптическая схема эксперимента микровзрыва полистироловых микрочастиц

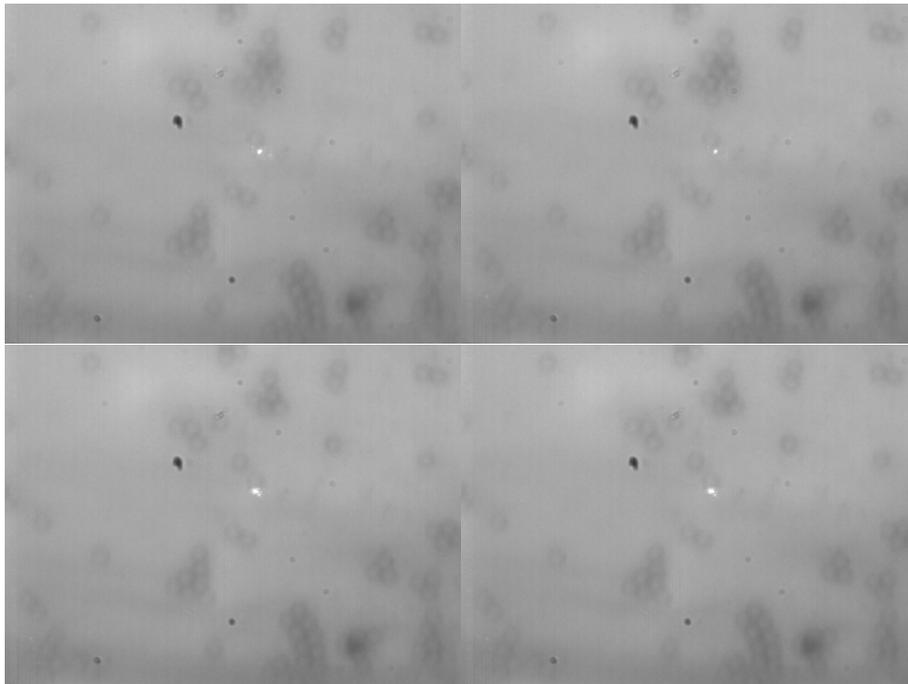


Рис. 6. Перемещение полистироловых микрочастиц посредством взрыва центральной частицы при частоте кадров 1902 к/с (изображение пучка смещено из-за несоосности объективов)

осветителя;  $L_1$  — фокусирующий микрообъектив ( $20\times, 40\times, 90\times$ );  $L_2$  — изображающий микрообъектив ( $16\times$ ); CCD — видеокамера;  $V$  — кювета с микрообъектами. В эксперименте были использованы две CCD-камеры VS-СТТ-252 с разрешением  $2048 \times 1536$  и MDCE-5A с разрешением  $1280 \times 1024$ .

Теперь перейдем к результатам эксперимента. Ниже будут показаны результаты эксперимента на рисунке 6.

## 2. Интерференция на подложке, покрытой слоем алюминия

### 2.1. Теоретическая часть

В качестве математической модели рассмотрим интерференцию падающей и отражённой волн в плоскопараллельной пластине (данному случаю соответствует интерференция падающего и отражённого пучков на подложке, покрытой алюминием). Таким образом, будет вычислена интенсивность света двух когерентных волн, которые образуются от одного и того же

монохроматического источника (непрерывный ультрафиолетовый лазер DTL-375 с длиной волны 355 нм и максимальной средней мощностью 40 мВт).

Обратимся к рисунку 7. Рассмотрим разность хода между 2-мя лучами (1 и 2). Производя несложные геометрические преобразования, получаем:

$$\Delta = n_2(AB + BC) - n_1AN. \quad (6)$$

Если  $h$  — расстояние между поверхностью подложки и слоем алюминия, а  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — углы падения и преломления на верхней поверхности, то получаем

$$AB = BC = h/\cos \varphi_2. \quad (7)$$

$$AN = AC \sin \varphi_1 = 2h \operatorname{tg} \varphi_2 \sin \varphi_1. \quad (8)$$

Из (1), (2) и (3), с учётом закона преломления

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2. \quad (9)$$

Получаем, что

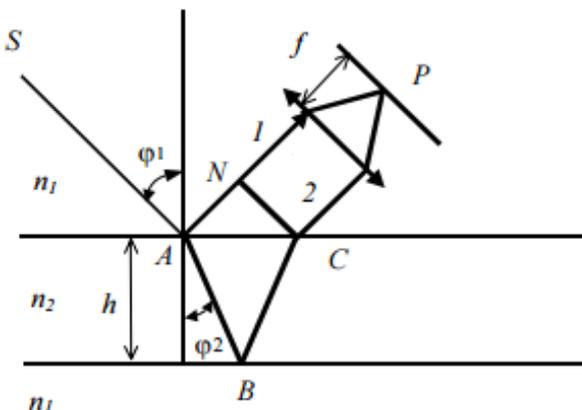


Рис. 7. Геометрическое описание пути пучков 1 и 2

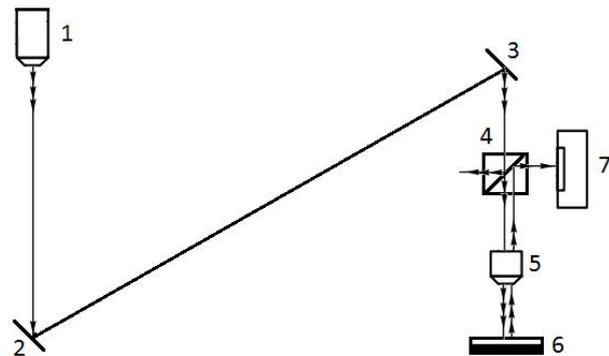


Рис. 8. Оптическая схема эксперимента по захвату полистироловых микрочастиц при помощи ультрафиолетового лазера

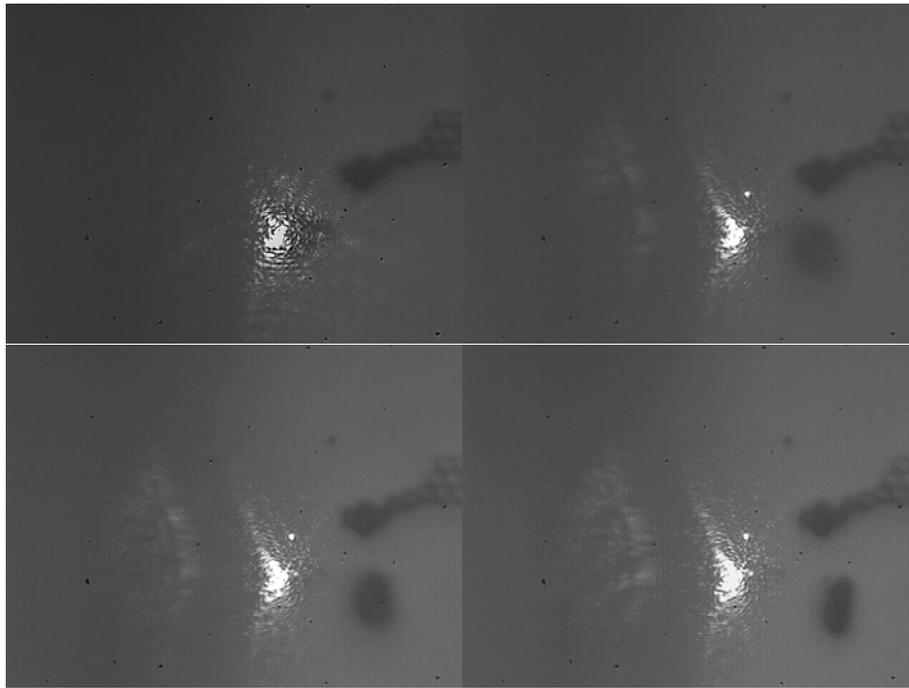


Рис. 9. Процесс перемещения частиц полистирола после взрыва на подложке, покрытой алюминием. Интервал времени между кадрами составляем 0,01 с

$$\begin{aligned} \Delta &= 2n_2AB - n_1AN = \frac{2hn_2}{\cos\varphi_2} - 2hn_1 \operatorname{tg}\varphi_2 \sin\varphi_1 = \\ &= \frac{2h}{\cos\varphi_2} (n_2 - n_1 \sin\varphi_1 \sin\varphi_2) = 2hn_2 \cos\varphi_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Соответствующая разность фаз (с учётом изменения фазы на  $\pi$ , которое происходит при отражении от более плотной среды) равна

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta \pm \pi = \frac{4\pi hn_2 \cos\varphi_2}{\lambda_0} \pm \pi. \quad (11)$$

Если интенсивности рассматриваемых когерентных лучей обозначит как  $I_1$  и  $I_2$ , то полная интенсивность в точке  $P$  определится следующим соотношением:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta. \quad (12)$$

Учитывая, что в нашем случае происходит нормальное падение светового пучка ( $\cos\varphi_2 \approx 1$ ), получаем:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi hn_2}{\lambda_0} \pm \pi\right). \quad (13)$$

Таким образом, найдено выражение, которое описывает интерференцию падающего и отражённого от слоя алюминия пучков. Подставляя необходимые значения в формулу (8), получим суммарную интенсивность и сравним данное значение со значением интенсивности без учёта взаимодействия двух пучков (т. е. с численным значением интенсивности на кварцевой подложке).

Максимальная интенсивность при учёте интерференции составляет 1,4991, а без — 1. Таким образом,

максимальное значение при интерференции почти в полтора раза больше значения интенсивности при некогерентном взаимодействии пучков.

## 2.2. Проверка наблюдаемого эффекта при помощи натурального эксперимента

Рассмотрим установку, которая использовалась в процессе наблюдения натурального эксперимента по микровзрыву полистироловых микрочастиц на подложке, покрытой слоем алюминия, толщиной в 100 нм. В оптической схеме на рисунке 8 введены следующие обозначения: 1 — непрерывный ультрафиолетовый лазер DTL-375 с длиной волны 355 нм и максимальной средней мощностью 40 мВт; 2, 3 — поворотные зеркала; 4 — кубик с полупрозрачными зеркалами, (пропускная способность в прямом направлении составляет 60 % от падающей энергии лазерного излучения, 40 % идёт на отражение); 5 — фокусирующий микрообъектив ( $20\times$ ); 6 — подложка, покрытая алюминием с микрочастицами полистирола; 7 — CCD-камера FastVideo 500 E с разрешением  $640 \times 480$ .

На рисунке 9 отображён процесс перемещения группы полистироловых микрочастиц после взрыва близлежащей частицы полистирола. Таким образом, исходя из того, что при тех же экспериментальных условиях на кварцевой подложке ничего не происходит, а на подложке, покрытой слоем алюминия, происходят микровзрывы полистироловых микрочастиц можно сделать вывод о том, что на данной подложке наблюдается процесс интерференции между пучком, падающим на данную подложку и пучком, отражённым от неё.

### Заклучение

В процессе выполнения данной работы были получены следующие основные результаты:

- разработана модель нагрева полистироловой микрочастицы, учитывая, что на рассматриваемый микрообъект падает плоский пучок и фокус находится в центре микросферы. В качестве изменяемых параметров были взяты радиус и мощность лазерного пучка, падающего на микрочастицу;
- на качественном уровне были сравнены результаты теоретического исследования и результаты

эксперимента. Была выявлена качественная сходимость результатов численного моделирования к экспериментальным данным;

- проведено теоретическое и экспериментальное обоснование эффекта интерференции падающего и отражённого пучков с использованием подложки, покрытой алюминием. Сделано качественное сравнение подложек, используемых для проведения эксперимента на отражение. В результате выявлена интерференция при использовании подложки с высоким коэффициентом отражения.

### Список источников

- [1] **Скиданов, Р.В.** Оптическая микроманипуляция с использованием микровзрывов частиц полистирола / Р.В. Скиданов, А.А. Морозов // Компьютерная оптика. — 2010. — Том 3. — № 34. — С. 302–307.
- [2] **Порфирьев, А.П.** Составной световой пучок и микровзрывы для оптической микроманипуляции / А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов // Компьютерная оптика. — 2012. — Том 3. — № 36. — С. 371–376.
- [3] **A. Ashkin** Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams / Ashkin A., Dziedzic J.M., Yamane T // Nature. — 1987. — Vol 330. — № 2. — P. 769–771.
- [4] **C. Sun** Cell manipulation by use of diamond microparticles as handles of optical tweezers / Sun C., Huang C., Cheng P.C., Liu H., Lin B // Opt. Soc. Am. — 2001. — Vol 18. — № 3. — P. 1483–1489.

## Modeling and experimental research destruction of a spherical polystyrene microparticle in a pulsed ultraviolet laser beam

*V.S. Vasilev<sup>1</sup>, R.V. Skidanov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

<sup>2</sup> Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences — Branch of the Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Model of heating polystyrene microparticle with case that source function it is heating cone were described. Experiment of microexplosions polystyrene microparticles on quartz and aluminum substrate with wavelength equals to 355 nm were showed.

**Keywords:** Microexplosions, UV laser beam, Polystyrene microbits, Velocity of microparticle, Quartz substrate, Aluminum substrate.

#### 4.7. Технологии дифракционной коррекции изображения в разработке фотошаблонов для УФ фотолитографии

Н. Н. Балан

АО «Ангстрем-Т», Москва, Россия

Представлен обзор основных методов повышения разрешающей способности проекционной фотолитографии. Рассмотрены главные разновидности одного из этих методов — дифракционной коррекции изображения, генерируемого на фотошаблоне (или коррекции оптической близости).

**Ключевые слова:** Коррекция оптической близости, Методы увеличения разрешающей способности фотолитографии, ГУФ-литография.

##### Введение

Как известно, количество элементов производимых интегральных схем удваивается примерно каждые 24 месяца, что ведет к уменьшению проектных норм и применению по всей технологической цепочке (особенно, при литографии) все более точного и дорогостоящего оборудования [1]. И эта тенденция практически не нарушается уже более 50-ти лет.

Главным и бесспорным преимуществом фотолитографии в сравнении, например, с высокоразрешающей электронно-лучевой литографией является возможность практически мгновенного и одновременного переноса многих миллионов элементов изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину.

Сегодняшний уровень развития фотолитографического оборудования, применяемого в производстве электронных компонентов, может быть проиллюстрирован рисунком 1, на котором показаны возможности современного степпер-сканера TWINSCAN 1250 фирмы ASML (Нидерланды) [2] — установки, производящей перенос изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину. Изображенная установка соответствует уровню 10-летней давности. Она позволяет производить литографию по полупроводниковым пластинам с размером элемента рисунка 50 нм и со скоростью 100 пластин (диаметром 300 мм) в час. При этом точность позиционирования элементов рисунка

(т. н. «регистрация») составляет  $\pm 10$  нм по всей пластине. В качестве сравнения: это соответствует ситуации, если бы менее, чем за одну минуту (!), вся территория Нидерландов была покрыта плотным рисунком с размером элемента 5 см и с точностью позиционирования элементов  $\pm 1$  см по всей площади покрытия.

Такие установки изготавливаются исключительно с использованием широкой международной кооперации (как, впрочем, и все остальное оборудование для полупроводниковой промышленности). В частности, стоимость объектива сканера TWINSCAN 1250 (виден на рисунке 1) составляет около 40 % стоимости всей установки и изготавливается компанией Carl Zeiss (Германия). Такие объективы вместе с осветителями представляют собой весьма сложные оптические системы, содержащие десятки линз высочайшего качества обработки (рисунок 2). Устройства транспортировки пластин и фотошаблонов, источники излучения, измерительные узлы и агрегаты изготавливаются рядом фирм со всего мира.

Минимальный размер полупериода (half-pitch) элементов (F) фотолитографии может быть определен по формуле

$$F = \frac{k_1 \lambda}{NA}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны экспонирующего излучения,  $NA = n \sin \theta$  — числовая апертура объектива ( $\theta$  —

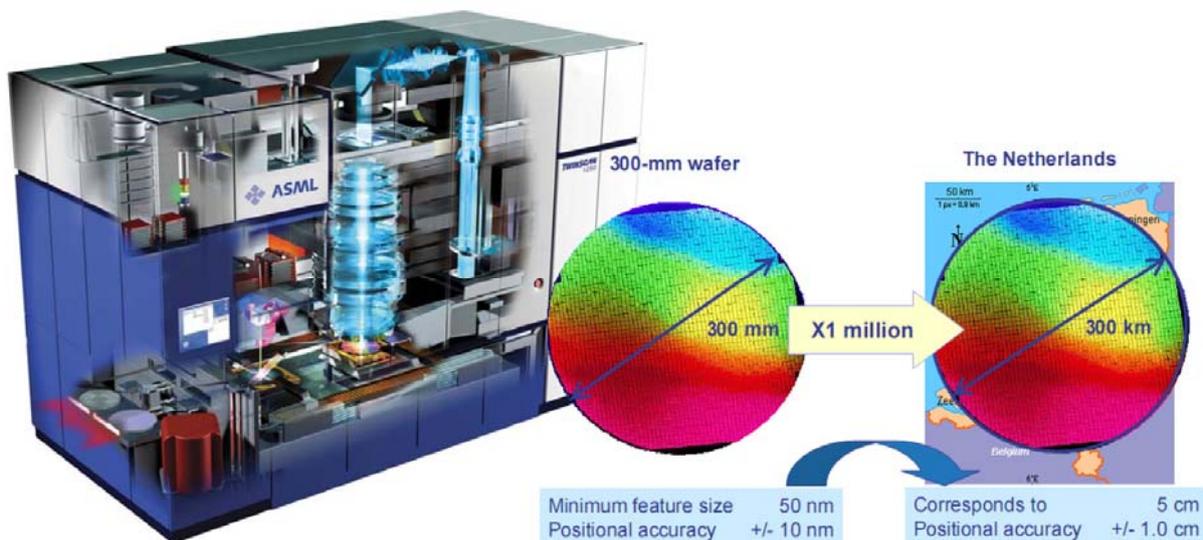
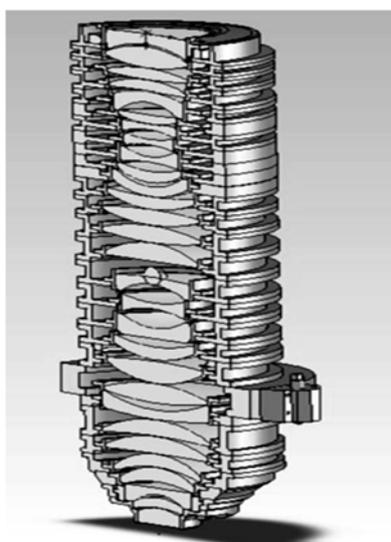


Рис. 1. Степпер-сканер ASML TWINSCAN 1250 и его возможности



а) внешний вид [3]



б) структура [4]

Рис. 2. Типичные объективы современных литографических систем

апертурный угол,  $n$  — показатель преломления среды), а  $k_1$  — коэффициент, зависящий от технологии. В классической Релевской формуле для разрешения оптических систем этот коэффициент равен 0,61 [4].

Уменьшение  $F$  может достигаться различными путями. Это и *переход к меньшим длинам волн*, и *увеличение числовой апертуры*, и *уменьшение технологического коэффициента  $k_1$* , значение которого при применении ряда методов может быть доведено до 0,28 (и даже менее).

В настоящее время в подавляющем большинстве процессов фотолитографии используется рабочее излучение трех длин волн:

- 365 нм — так называемая  $i$ -линия спектра ртути, используемая на некритичных слоях литографии, либо в технологических процессах с  $F \geq 250$  нм, в качестве источника излучения могут использоваться мощные дуговые ртутные лампы или аргоновые лазеры;

- 248 нм — глубокий ультрафиолет или ГУФ, применяются KrF эксимерные лазеры;

- 193 нм — ГУФ, применяются ArF эксимерные лазеры.

**Переход к излучателям с меньшими длинами волн** (доступны источники излучения на длинах волн 157 нм, 126 нм, 116 нм и 13,5 нм) является самым дорогостоящим методом уменьшения  $F$ . Такие методы сопряжены с усложнением конструкции объективов, исследованием новых материалов, разработкой новых технологических процессов, созданием нового прецизионного оборудования. В оптической литографии на используемых в настоящее время длинах волн в качестве материала линз используется кварцевое стекло. Но, например, при длине волны 157 нм (излучение эксимерных  $F_2$  лазеров) оно не обладает приемлемым пропусканием. Поэтому при разработке литографического оборудования, работающего на длине волны 157 нм, основной упор был сделан на рассмотрение флюорида

кальция в качестве материала линз, что привело к значительным проблемам, связанным с изготовлением достаточного количества высокочистого  $CaF_2$  и преодолением эффекта двойного лучепреломления, свойственного этому материалу. Кроме того, необходимо было учитывать его гигроскопичность. В итоге выигрыш в  $F$  по сравнению с иммерсионной литографией на длине волны 193 нм (см. далее) был признан незначительным [7].

Примерно в это же время (середина 2000-х гг.) начались работы по использованию в литографии вакуумного ультрафиолета (или экстремального ультрафиолета, EUV или ЭУФ). Для этого излучения ( $\lambda = 13,5$  нм) прозрачных материалов не существует, поэтому все элементы оптических систем подобных установок (включая фотошаблоны) могут быть только отражающими и должны находиться в вакууме. Полупроводниковые пластины, на которые переносится изображение, должны находиться там же. Кроме того, очень трудоемкой задачей явилось создание источника излучения достаточной мощности, а также резистов для работы с ним. Изготовление оптических элементов и фотошаблонов для таких систем весьма затратно. Достаточно отметить хотя бы то, что отражающее покрытие для ЭУФ излучения 13,5 нм представляет собой брэгговское зеркало из 40–60 пар тонких слоев металлического молибдена (Mo) толщиной 3 нм и аморфного кремния (Si) толщиной 4 нм, нанесенных на стеклокерамическую (ситалловую) подложку заданной кривизны с исключительно высоким качеством полировки. «Шероховатость» поверхности такой подложки не должна превышать 0,2 нм ( $3\sigma$ )! При этих условиях отражающая способность зеркала составляет величину 65–66 % для длины волны 13,5 нм [8]. Кроме того, материал подложки должен иметь нулевой коэффициент термического расширения в диапазоне рабочих температур [9].

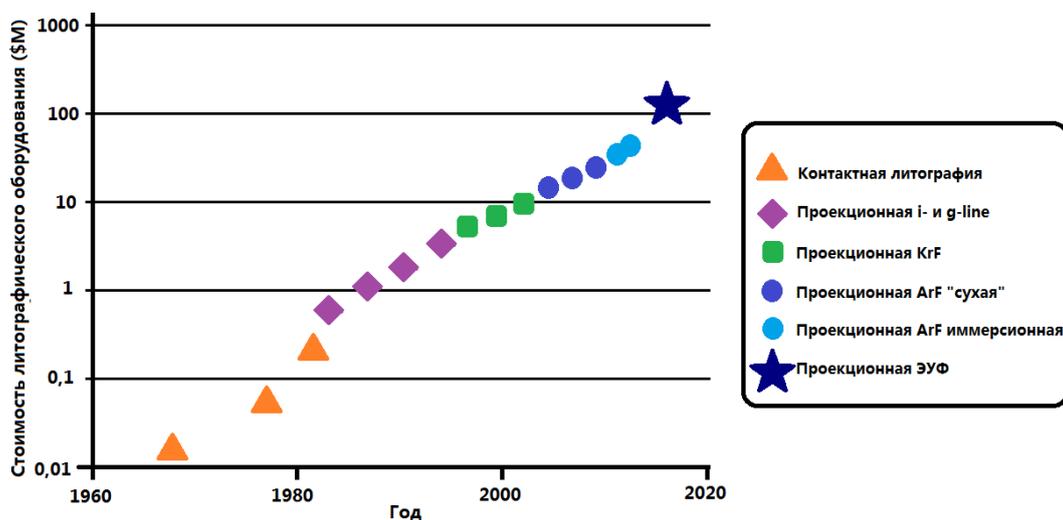


Рис. 2. Экспоненциальный рост стоимости оборудования фотолитографии [5]

Легко представить затраты, в которые обходится создание такого оборудования. Между тем, эти установки уже выпускаются серийно [10] и используются в промышленности, несмотря на то, что их цена находится в районе сотни миллионов долларов. На рисунке 2 показаны тенденции роста стоимости фотолитографического оборудования практически за всю историю микроэлектроники.

Таким образом, основным препятствием для развития проекционной фотолитографии в сторону уменьшения длин волн используемого излучения являются не столько физические пределы, сколько денежные расходы, связанные с этим переходом.

**Увеличение числовой апертуры NA** объектива фотолитографической установки явилось гораздо менее дорогим методом, однако трудно переоценить его значение для повышения степени интеграции элементов полупроводниковых устройств.

Суть метода заключается во введении жидкости (воды или другой жидкости с высоким показателем преломления) между проекционным оптическим объективом и полупроводниковой пластиной для получения проекционной системы с эффективной числовой апертурой более единицы, что, в конечном счете, улучшает разрешающую способность. Кроме того, данная методика позволяет существенно выиграть в глубине фокуса в сравнении с «сухими» объективами.

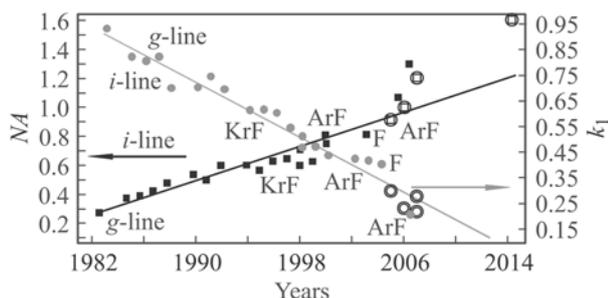


Рис. 3. Изменение параметров NA и  $k_1$  за годы развития микроэлектроники [4]

Иммерсия в 2003 и 2004 годах рассматривалась как технология, которая продвинет применение излучения с длиной волны 193 нм до уровня критических размеров 45 нм и далее. Ожидания оправдались, и иммерсионная технология пошла в серию сразу после преодоления основных трудностей, таких как образование мелких пузырьков или выщелачивание резиста. В настоящее время трудно представить себе производство изделий уровня 45 нм и менее без применения иммерсионной фотолитографии.

**Уменьшение технологического коэффициента  $k_1$**  достигается применением таких методик, как:

- двойное паттернирование (позволяет заменить критический литографический слой двумя некритическими, «впечатывая» картинку в два этапа);
- введение фазовых элементов на фотошаблоне (позволяет перераспределить интенсивности дифракционных порядков передаваемого через оптическую систему изображения и тем самым улучшить контраст изображения, а, следовательно, и качество его передачи);
- внеосевое освещение фотошаблона;
- *дифракционная коррекция изображения на фотошаблоне* или коррекция оптической близости (OPC — Optical Proximity Correction).

На рисунке 3 показано, как за годы развития микроэлектроники изменялись типичные значения NA и  $k_1$ .

Далее в статье будут описаны основные технологии дифракционной коррекции изображения в сочетании с внеосевым освещением как важнейшие и самые доступные методики уменьшения технологического коэффициента  $k_1$  и, следовательно, улучшения разрешения проекционной фотолитографии.

### 1. Внеосевое освещение фотошаблона

Внеосевое освещение фотошаблона позволяет добиться повышения, прежде всего, глубины фокуса в случае переноса некоторого заданного типа изображений, например, периодических линий определенной ориентации, периода и т. п. Кроме того, значительно

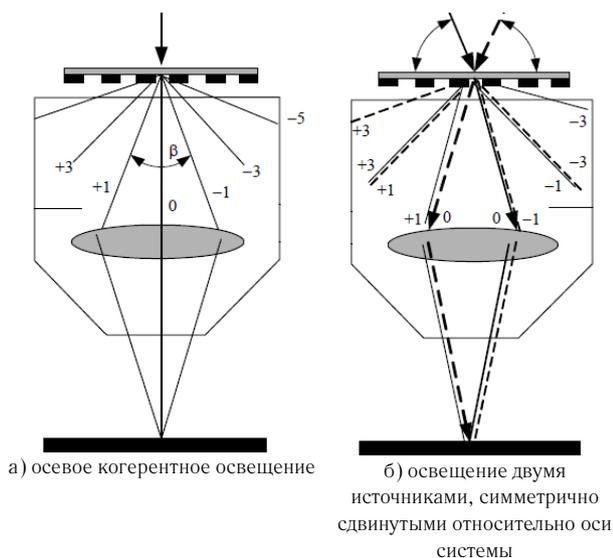


Рис. 4. Схема внеосевого освещения фотошаблона [11]

увеличивается разрешающая способность. Если изображение на фотошаблоне представляет собой картину периодических линий, то его дифракционная картина состоит из дискретных дифракционных порядков. Необходимым условием для передачи такого изображения является попадание в апертуру объектива по меньшей мере 0-го, 1-го и  $-1$ -го дифракционных порядков. Смещая источник излучения (предположим для простоты, что он точечный) в сторону от оси оптической системы, можно добиться попадания в апертуру лишь 0-го и 1-го порядков дифракционной картины. Добавив еще один симметрично смещенный относительно оси источник излучения, добьемся попадания 0-го и  $-1$ -го порядков (рисунок 4).

Таким образом, угол схождения пучков уменьшается практически в 2 раза, и, соответственно, повышается как глубина фокуса, так и разрешающая способность (для изображения с определенными периодом и ориентацией линий). В рассмотренном идеальном случае минимальный размер полупериода элементов будет равен [6]

$$F = 0,25 \frac{\lambda}{NA}. \quad (2)$$

В случае необходимости отображения картины, состоящей одновременно из линий вертикальной и горизонтальной ориентации (т. н. Manhattan Geometry) бывает удобно использовать квадрупольный осветитель (крайний справа на рисунке 5), в случае линий разнообразной ориентации, но одинакового периода, — аннулярный (средний на рисунке 5).

В настоящее время существуют литографические установки с возможностью задания более сложной формы осветителя [12]. Обычно подбор оптимальной формы осветителя для той или иной топологии производится в первую очередь, после чего принимается решение о дальнейшей дифракционной коррекции изображения (коррекции оптической близости).

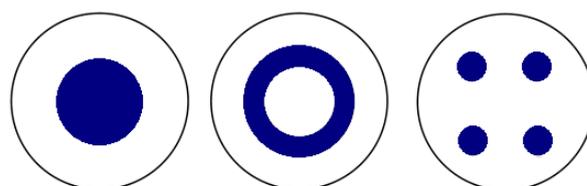


Рис. 5. Формы осветителя, наиболее часто используемые на практике: частично-когерентный, аннулярный, квадрупольный [6]

## 2. Коррекция оптической близости на основе правил (Rule Based OPC, RBOPC)

Очевидно, что при экспонировании изображение претерпевает дифракционные искажения при переносе с фотошаблона в резист на полупроводниковой пластине в случае, если оно имеет элементы, сравнимые с предельным размером по Рэлю-Аббе. Таких искажений может быть целое семейство: это сокращение и скругление концов линий, искажения при переносе зазоров, углов и т. д. Борьба с дифракционными искажениями состоит в упреждающем создании вспомогательных элементов на фотошаблоне, которые в силу своих небольших размеров сами не переносятся на пластину, но позволяют корректно воспроизвести требуемое изображение (рисунок 6). Введение этих элементов усложняет фотошаблон и увеличивает его стоимость, но делает переносимый рисунок приемлемым для создания приборов нужного уровня. На настоящий момент имеется ряд программных комплексов [13, 14], позволяющих в автоматическом режиме видоизменять изображение на фотошаблоне, добавляя вспомогательные элементы ко всем критическим частям этого изображения (число которых может достигать миллионов и более).

Коррекция оптической близости на основе правил состоит в создании системы правил, на основании которых производится анализ исходного изображения, принятие решения о его видоизменении и добавлении вспомогательных элементов. Необходимые правила разрабатываются эмпирическим путем, при проведении серий экспериментов по экспонированию разнообразных тестовых структур (примитивов), возможна также их разработка путем моделирования.

Метод RBOPC используется в случаях изображений, не требующих сложных преобразований. К этому методу можно отнести также разнообразные припуски элементов, выполняемые на стадии разработки исходной топологической информации.

## 3. Коррекция оптической близости на основе моделирования (Model Based OPC, MBOPC)

Коррекция оптической близости на основе моделирования используется при работе с изображениями, имеющими много сложных элементов с размерами, сравнимыми с пределом разрешения используемой фотолитографической установки. Это более сложная методика, требующая гораздо больших вычислительных ресурсов в сравнении с RBOPC.

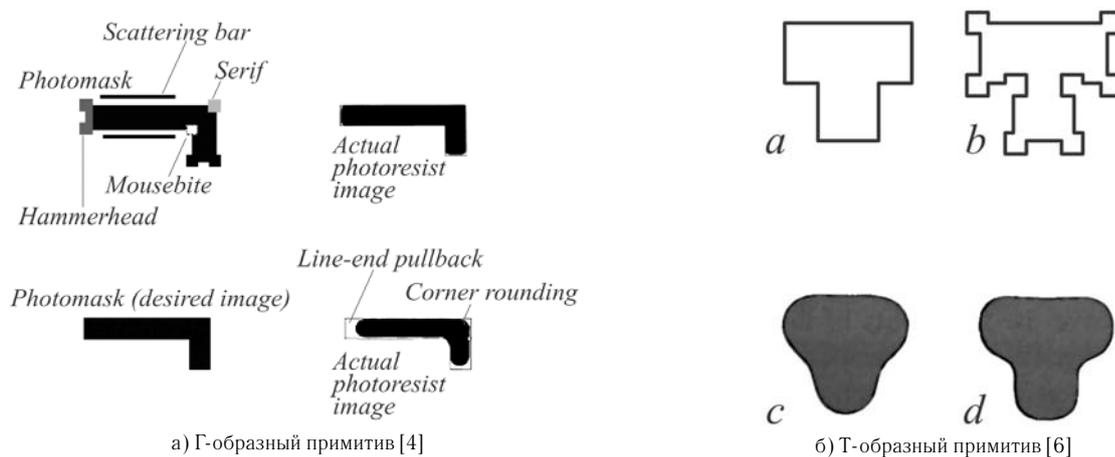


Рис. 6. Пример применения вспомогательных элементов дифракционной коррекции при переносе изображения на полупроводниковую пластину при проекционной фотолитографии

В случае МВОРС топология литографического слоя делится на небольшие участки, а элементы изображения в каждом из участков сегментируются с определенным шагом. Далее для каждого участка топологии рассчитывается так называемое «воздушное изображение» — распределение интенсивности вблизи поверхности полупроводниковой пластины по методу Хопкинса [15]:

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} TCC(f_x, \tilde{f}_x) T_m^*(f_x) T_m^*(\tilde{f}_x) e^{2\pi i(f_x - \tilde{f}_x)x} df_x d\tilde{f}_x, \quad (3)$$

где

$$TCC(f_x, \tilde{f}_x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(f_x + f'_x) P^*(\tilde{f}_x + f'_x) \tilde{S}(f'_x) df'_x$$

так называемый «передаточный кросс-коэффициент» (transmission cross-coefficient), зависящий только от свойств оптической системы и формы осветителя,

$$P(f_x) = \begin{cases} 1, & f_x \leq NA / \lambda \\ 0, & f_x > NA / \lambda \end{cases}$$

функция зрачка,

$\tilde{S}(f_x)$  — нормализованная функция осветителя,

$$T_m(f_x) = F\{E_i(x)t_m(x)\}$$

фурье-образ произведения амплитуды падающего на фотошаблон излучения на функцию пропускания фотошаблона (в общем случае комплексную), собственно и являющуюся исходным изображением. Для простоты рассмотрен одномерный случай, как на рисунке 4, кроме того, не учтена возможная дефокусировка.

Основное достоинство метода Хопкинса состоит в том, что передаточный кросс-коэффициент  $TCC$  (в двумерном дискретном случае это четырехмерная матрица) может быть рассчитан единственный раз, после чего можно производить расчеты распределения интенсивности для абсолютно разных исходных изображений.

Следующая стадия моделирования состоит в расчете изображения в резисте, полученного после его экспонирования и обработки. Для этого, как правило,

используются пороговые полуэмпирические «VT-модели» (VT — Various Threshold), калибруемые на основе измерений набора специальных тестовых структур, проэкспонированных заранее [17]. Такие модели позволяют рассчитать форму резистной маски по воздушному изображению и учитывают физику процессов лишь частично, обладая при этом достаточной точностью и на порядки большим быстродействием по сравнению с первопринципными моделями, используемыми в так называемых «процессных» САПР [16]. Наиболее часто используемым вариантом является модель VT5, реализованная практически во всех «конструкторско-технологических» [16] литографических САПР, работающих с полноразмерными топологиями.

После расчета изображения в резисте в пределах выбранного участка оно сравнивается с требуемым, и, в случае неудовлетворительного результата, исходное изображение корректируется путем изменения размера сегментов в зависимости от величины расхождения.

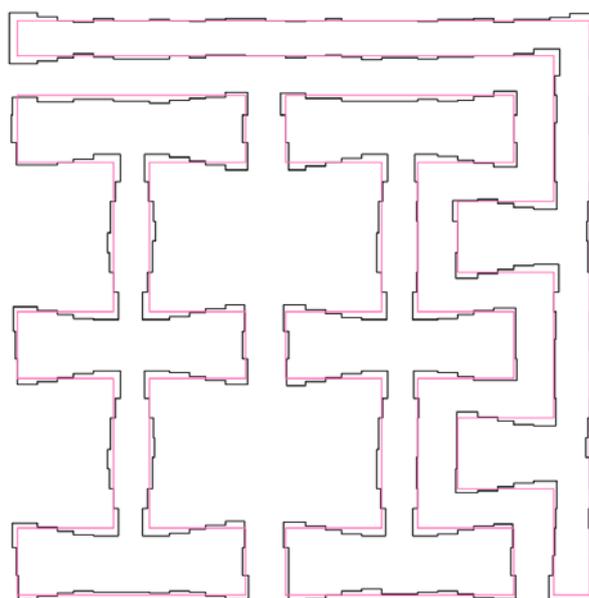


Рис. 7. Коррекция изображения методом МВОРС [18]

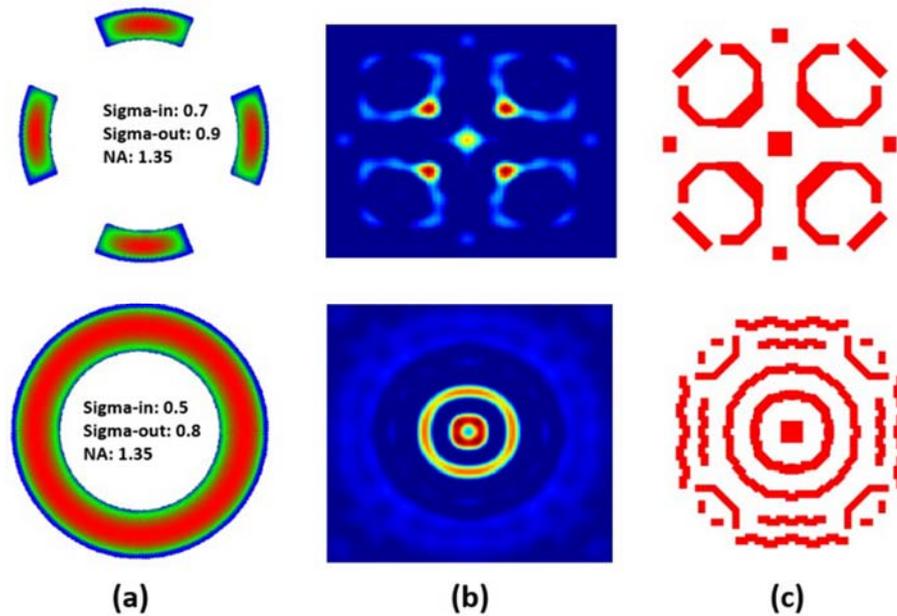


Рис. 8 Форма осветителя (а), промежуточное полутоновое изображение (b) и окончательное оптимизированное изображение фотошаблона для литографии одиночного контактного окна [20]

После этого процесс моделирования в пределах выбранного участка повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто соответствие рассчитанного изображения в резисте с требуемым.

Далее все то же самое повторяется для следующего участка топологии и т. д. до тех пор, пока не будет просчитана вся топология литографического слоя. Рисунок 7 иллюстрирует, как в результате будет выглядеть скорректированное изображение.

Здесь была рассмотрена т. н. методика ЕВОРС (Edge Based OPC), в которой изображение сегментируется на угловые и краевые элементы. Более сложный подход именуется РВОРС (Pixel Based OPC) [23] и подразумевает деление участка изображения фактически на отдельные пиксели с дальнейшей его оптимизацией. Такой подход имеет гораздо больше возможностей, но и требует значительных вычислительных ресурсов.

#### 4. Технология обратной литографии (Inverse Lithography Technics)

Данный вид технологии коррекции оптической близости является на сегодняшний момент самым многообещающим. Он подразумевает решение обратной задачи литографии с дальнейшим выбором наилучшего из всех полученных вариантов полутонного изображения и переводом его в бинарный вид. При этом возможна также оптимизация формы осветителя. Им-

пульсный отклик системы может учитывать, как искажения, вносимые объективом, так и процессы проявления и травления. Несмотря на то, что арсенал средств уменьшения  $k_1$  на сегодняшний момент выглядит почти исчерпанным, данная методика позволяет продвинуться в этом направлении еще дальше. Метод позволяет генерировать зависящие от формы осветителя сложные вспомогательные элементы SRAF (Sub-resolution assist features), существенно расширяющие процессное окно [20] (рисунок 8).

С математическими методами, используемыми в данной технологии, можно ознакомиться, например, в работах [20–22].

#### Заключение

За годы использования проекционной оптической литографии в производстве интегральных схем неоднократно возникали ожидания достижения предела ее разрешающей способности с дальнейшим переходом к альтернативным литографическим техникам (электронный луч, наноимпринт, рентгеновская литография и т. д.). Однако, как показывает практика, проекционная УФ фотолитография не сдает позиции до сих пор. Способы повышения разрешающей способности, разработанные для ГУФ-фотолитографии, а прежде всего, методики дифракционной коррекции изображения, однозначно найдут свое применение в ЭУФ-литографии при переходе интегральной микроэлектроники к следующим технологическим уровням.

#### Список источников

- [1] Moore, G. E. Cramming More Components onto Integrated Circuits/ G. E. Moore // Electronics. — 1965. — Vol 38. — № 8. — P. 114–117.
- [2] ASML Docs / URL: [https://staticwww.asml.com/doclib/investor/05\\_analyst\\_day\\_internet\\_031113.pdf](https://staticwww.asml.com/doclib/investor/05_analyst_day_internet_031113.pdf).
- [3] ASML investeert in toeleverancier Carl Zeiss SMT / URL: <http://www.linkmagazine.nl/asml-investeert-toeleverancier-carl-zeiss-smt/>.

- [4] **Сейсян, Р. П.** Нанолитография в микроэлектронике (Обзор) / Р. П. Сейсян // Журнал технической физики. — 2011. — Том 81. — вып. 8. — С. 1–14.
- [5] Is the cost reduction associated with IC scaling over? / URL: [http://www.eetimes.com/author.asp?doc\\_id=1286363](http://www.eetimes.com/author.asp?doc_id=1286363).
- [6] **Макс, С.** Fundamental Principles of Optical Lithography. The Science of Microfabrication/ С. Макс — Wiley, 2008. — 534 p.
- [7] **Trybula, W. J.** Status of 157-nm optical lithography / W. J. Trybula // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. — 2005. — Vol 4. — № 1. — P. 011007-1-5.
- [8] **Quesnel, E.** Study of ion-beam-sputtered Mo/Si mirrors for EUV lithography mask: influence of sputtering gas / **E. Quesnel et al.** // Proceedings of SPIE: Advances in Optical Thin Films 88. — 2004. — Vol. 5250. — P. 88–98.
- [9] **Kawata, M.** Novel low thermal expansion material for EUV application / M. Kawata et al. // Proceedings of SPIE: Emerging Lithographic Technologies X. — 2006. — Vol. 61511A. — P. 61511A1-7.
- [10] ASML: Products — TWINSCAN NXE:3400B / URL: [https://www.asml.com/products/systems/twincan-nxe/en/s46772?dfp\\_product\\_id=10850](https://www.asml.com/products/systems/twincan-nxe/en/s46772?dfp_product_id=10850).
- [11] **Макарчук, В. В.** Методы литографии в наноинженерии / В. В. Макарчук, И. А. Родионов, Ю. Б. Цветков. — М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 2011. — 174 с.
- [12] **Rubingh, R.** Lithographic performance of a dual-stage 0.93NA ArF step and scan system / R. Rubingh et al. // Proceedings of SPIE: Optical Microlithography XVIII / 2005. Vol. 5754. P. 681–692.
- [13] Calibre nmOPC — Mentor Graphics / URL: <https://www.mentor.com/products/ic-manufacturing/computational-lithography/calibre-nmopc/>.
- [14] GenISys – Home / URL: <http://genisys-gmbh.com/web/>.
- [15] **Hopkins, H.** On the Diffraction Theory of Optical Images / H. Hopkins // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1953. — Vol 217. — P. 408–432.
- [16] **Амирханов, А.В.** Особенности методов проектирования СБИС с учетом результатов моделирования технологического процесса / А. В. Амирханов, А. А. Гладких, А. А. Глушко, Е. П. Михальцов, И. А. Родионов, А. А. Столяров // Труды НИИСИ РАН. — 2013. — Том 3. — № 1. — С. 10–19.
- [17] **Randall, J.** Lithography Simulation with Aerial Image -Variable Threshold Resist Model / J. Randall, H. Gangala, A. Trichkov // Microelectronic Engineering. — 1999. — Vol. 46. — P. 59–63.
- [19] **Cobb N.B.** Fast optical and process proximity correction algorithms for integrated circuit manufacturing / N. B. Cobb // PhD Dissertation. — University of California at Berkeley, 1998. — 139 p.
- [20] **Yenikaya B.** Full chip hierarchical inverse lithography: a solution with perfect symmetry/ B. Yenikaya// Proceedings of SPIE: Optical Microlithography XXX. — 2017. — Vol. 10147. — P. 1014701I. — 10 p.
- [21] **Lv W.** Level-set-based inverse lithography for mask synthesis using the conjugate gradient and an optimal time step/ W. Lv, S. Y. Liu, Q. Xia, X. F. Wu, Y. Shen, E. Y. Lam // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2013. — Vol. 31. — P. 041605-1. — 13 p.
- [22] **Lv W.** Effective simulation for robust inverse lithography using convolution-variation separation method / W. Lv, S. Liu, X. Zhou, H. Wei// Proceedings of SPIE: Optical Microlithography XXVII. — 2014. Vol. 9052. P. 90522C1-10.
- [23] **Ma X.** Resolution enhancement optimization methods in optical lithography with improved manufacturability / X. Ma, Y. Li // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS. — 2011. — Vol. 10. — № 2. — P. 023009-1-II.

## Diffraction Image Correction technologies for UV lithography reticle design

*N. N. Balan*

Angstrom-T, Moscow, Russia

The paper provides an overview of the main methodologies in UV photolithography resolution enhancement technics. The main types of maybe most important one — diffraction image correction (or optical proximity correction) are presented.

**Keywords:** Optical proximity correction, Resolution enhancement techniques, DUV-photolithography.

#### 4.8. Экспериментальное изучение зависимости коэффициента усиления предметной световой волны от толщины и ориентационного угла кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ для его эффективного использования в голографических приложениях

В. В. Шепелевич<sup>1</sup>, А. В. Макаревич<sup>1</sup>, С. М. Шандаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина, Мозырь, Беларусь

<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

Выполнены экспериментальные исследования ориентационной зависимости коэффициента усиления предметной световой волны от эффективной толщины фоторефрактивного кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  (BGO) при двухволновом взаимодействии с использованием только одного кристаллического образца среза толщины 16 мм. Показано, что только при учете обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов возможна удовлетворительная теоретическая интерпретация полученных экспериментальных данных, позволяющая оптимизировать регистрацию голографических решеток в этом представителе силленитов для его эффективного практического использования.

**Ключевые слова:** Голографическая решетка, Фоторефрактивный кристалл, BGO, Коэффициент усиления предметной световой волны, Пьезоэлектрический и фотоупругий эффекты.

##### Введение

Фоторефрактивные кристаллы силленитов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO),  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  (BGO) и  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (BTO) благодаря высокой светочувствительности и быстрому фотоотклику, реверсивности и практической неограниченности циклов записи и считывания голограмм находят применение во многих современных голографических приложениях [1, 2]. Однако известно, что выходные характеристики голограмм в силленитах существенно зависят от пространственной ориентации кристалла относительно взаимодействующих в нем световых пучков и их поляризации, а также от толщины и среза используемого кристаллического образца [3, 4]. Поэтому с целью наиболее эффективного практического применения кристаллов данного типа представляет интерес оптимизация выходных характеристик, сформированных в них голограмм, которая, в частности, может быть выполнена за счет специального выбора перечисленных выше условий записи голограммы и параметров кристалла. При этом отметим, что к важнейшим выходным энергетическим характеристикам голографических решеток в фоторефрактивных кристаллах обычно относят дифракционную эффективность голограммы и коэффициент усиления предметной световой волны.

Очевидно, что для предсказания оптимальных условий формирования и считывания голограмм в силленитах наиболее эффективно использовать теоретический расчет, поскольку определение таких условий экспериментально представляется громоздкой и трудоемкой задачей. Однако в данном случае имеет место другая задача — для реализации правильного теоретического расчета используемая физическая модель должна быть экспериментально апробирована. В связи с этим в рамках настоящей работы мы представляем результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента усиления предметного светового пучка от ориентационного угла и толщины кристалла BGO при различных азимутах линейной поляризации взаимодействующих в нем световых пучков.

Также мы даем интерпретацию полученных результатов на основании предложенной теоретической модели, хорошо согласующейся с экспериментом, что позволяет использовать эту модель для нахождения оптимальных условий взаимодействия световых пучков в данном кристалле.

##### 1. Методика проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований использовалась трапециевидная геометрия пересечения в кристалле опорного и предметного световых пучков, имеющих плоский волновой фронт, которая была предложена в статьях [5–7] для изучения зависимости коэффициента усиления предметной световой волны от толщины кристаллов силленитов. Однако представляется важным отметить, что в этих работах рассматривались только такие пространственные ориентации кристаллов, при которых вектор голографической решетки  $\mathbf{K}$  был перпендикулярен или параллелен кристаллографическому направлению  $[0, 0, 1]$ . Насколько известно, например, из [3, 4] в этих случаях вклад в выходные характеристики голограмм обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов (далее сокращенно «пьезоэффект») либо отсутствует ( $\mathbf{K} \parallel [0, 0, 1]$ ), либо им можно пренебречь ( $\mathbf{K} \perp [0, 0, 1]$ ). Таким образом, представляет интерес рассмотрение пространственных ориентаций кристалла BGO, отличающихся от указанных выше.

Общий принцип использования трапециевидной геометрии для изучения зависимости коэффициента усиления предметной световой волны от толщины кристаллического образца поясняется на рисунке 1а. При падении на кристалл опорного  $R$  и предметного  $S$  световых пучков под углом  $\varphi_0$  и после прохождения ими прямоугольной диафрагмы (обозначена черными клиньями перед кристаллом) в нем формируется голографическая решетка в форме равнобокой трапеции. При этом в светлой области голограммы пересечение пучков происходит при различных значениях эффективной толщины кристалла  $d$ , принадлежащей интервалу  $0 < d \leq d_0$ , а в затемненной — при фиксированной

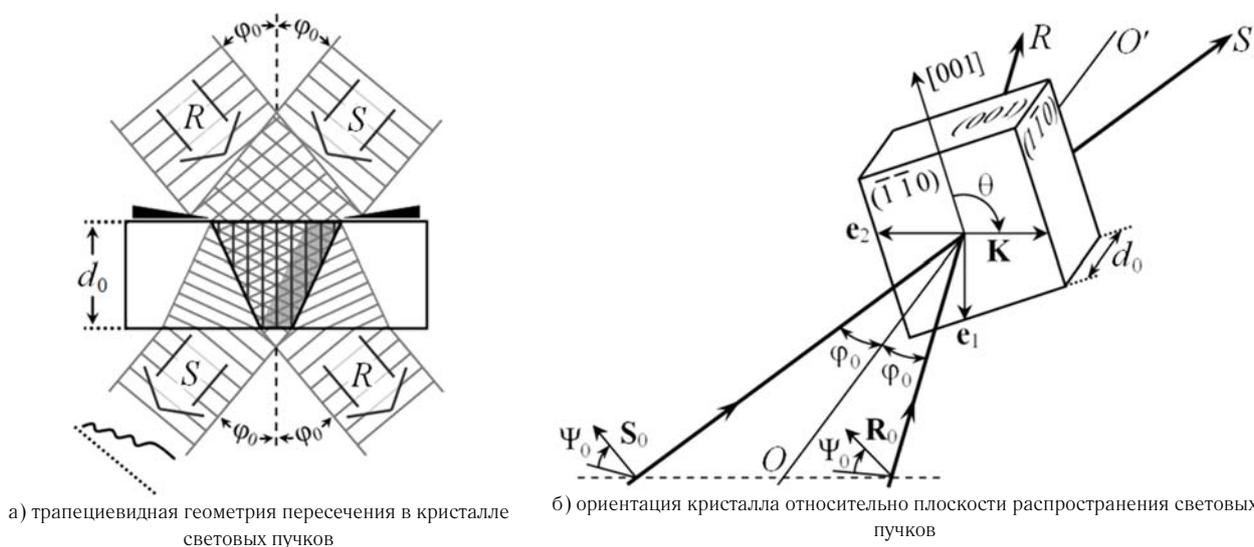


Рис. 1. Взаимодействие световых пучков в кристалле BGO

толщине  $d_0$ . Очевидно, что при таком подходе, используя только один кристаллический образец, можно получить зависимость коэффициента усиления предметной световой волны от эффективной толщины кристаллического образца.

Ориентация использованного в эксперименте кристалла BGO среза  $(\bar{1}\bar{1},0)$  толщины  $d_0 = 16$  мм относительно плоскости распространения световых пучков  $R$  и  $S$  с векторами напряженности электрического поля  $\mathbf{R}_0$  и  $\mathbf{S}_0$ , связанной с рабочей системой координат, имеющей орты  $\mathbf{e}_1$ ,  $\mathbf{e}_2$  и  $\mathbf{e}_3$ , представлена на рисунке 1б. Угол пространственной ориентации кристалла отсчитывался от кристаллографического направления  $[001]$  к вектору голографической решетки  $\mathbf{K}$ . При изменении кристалл проворачивался вокруг оси  $OO'$ . Направление отсчета азимута линейной поляризации световых пучков  $\Psi_0$  также показано на этом рисунке. Отметим, что данная геометрия взаимодействия в кристалле световых пучков в [8, 9] впервые нами была использована для экспериментального изучения зависимости дифракционной эффективности голограмм от толщины кристалла BSO.

## 2. Результаты и их обсуждение

Полученные теоретические с учетом и без учета пьезоэффекта, а также экспериментальные зависимости коэффициента усиления  $\gamma$  предметной световой волны от ориентационного угла  $\theta$  и толщины  $d$  указанного выше образца кристалла BGO при  $\Psi_0 = 0$  и  $90^\circ$ , представлены на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, только учет пьезоэффекта позволяет добиться согласования теории с экспериментальными результатами. Плоскостью  $d = 16$  мм на графиках, изображенных на этом рисунке, показана «граница» между двумя областями: областью, в которой взаимодействие пучков  $R$  и  $S$  происходило при различных значениях эффективной толщины кристалла  $d$  ( $0 < d \leq d_0$ ), и областью, в которой взаимодействие

этих пучков осуществлялось при постоянной эффективной толщине кристалла  $d_0$ .

Анализ этих графиков показал, что при повороте кристалла BGO на  $180^\circ$  перекачка энергии из одного пучка в другой меняется на противоположную, при этом гофрированный характер зависимостей  $\gamma(\theta, d)$  связан с естественной оптической активностью кристалла.

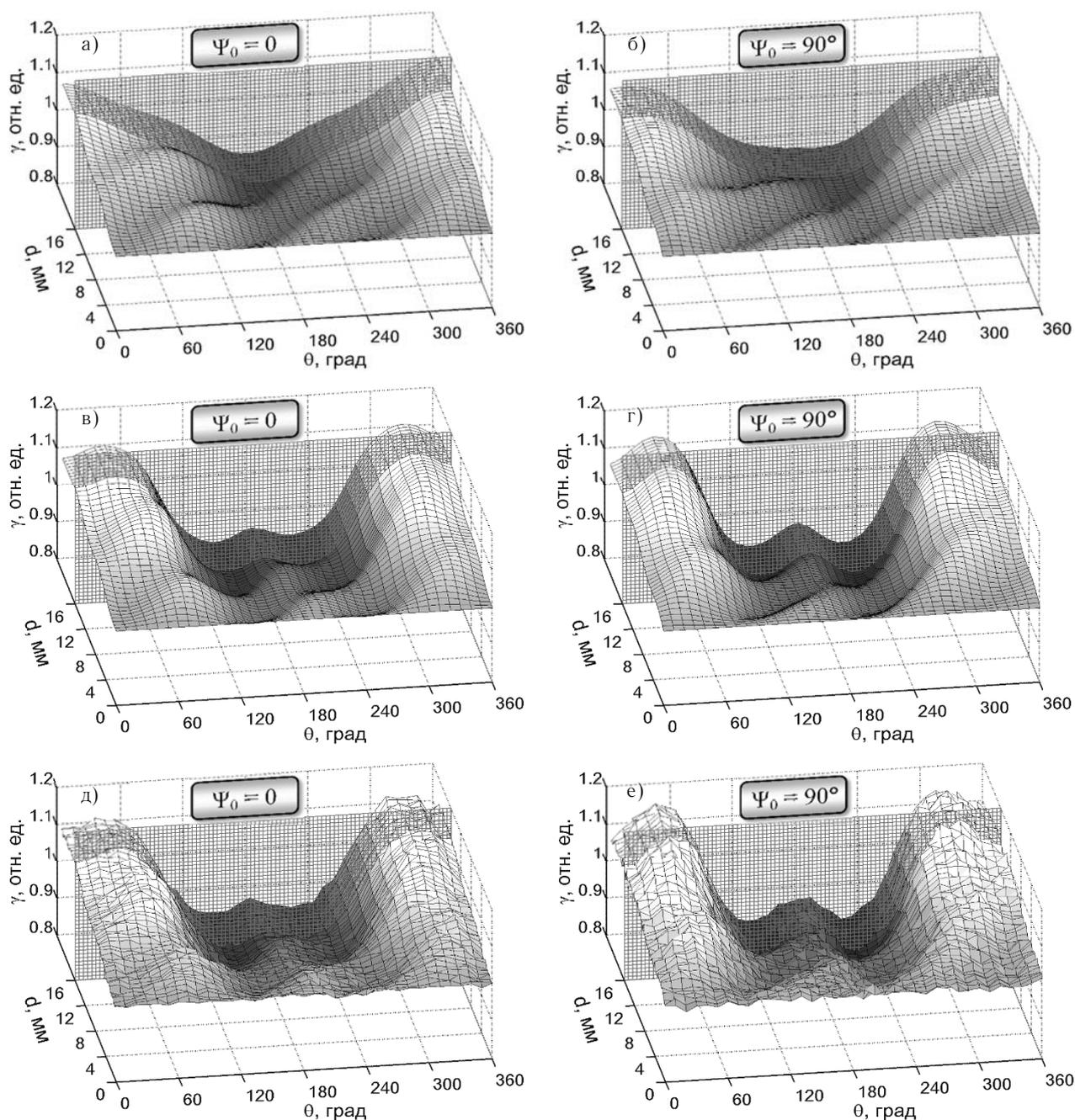
При проведении экспериментов использовался гелий-неоновый лазер с относительно малой мощностью излучения, равной 1,5 мВт. Отношение интенсивностей предметного и опорного световых пучков до вхождения в кристалл  $I_S^0 / I_R^0$  было приблизительно равно 0,25. Угол Брэгга  $\varphi_0$  вне кристалла составлял  $15^\circ$ .

Коэффициент усиления предметной световой волны определялся как отношение интенсивности предметного светового пучка на выходе из кристалла при наличии голографической решетки (наличии пучка  $R$ ) к интенсивности этого же пучка в отсутствие голографической решетки (в отсутствие пучка  $R$ ).

Исходя из полученных результатов, можно также сделать вывод о том, что проведение подобных исследований позволяет экспериментально обоснованно выявить значения ориентационного угла и толщины фоторефрактивного кристалла, при которых коэффициент усиления предметной световой волны достигает локальных максимумов. При этом следует отметить, что существенное увеличение значения может быть достигнуто за счет уменьшения отношения интенсивностей  $I_S^0 / I_R^0$  пучков  $R$  и  $S$ , однако решение такой задачи в рамках настоящей работы не рассматривалось.

## Заключение

Таким образом, для двух азимутов линейной поляризации световых пучков  $\Psi_0 = 0$  и  $90^\circ$  представлены экспериментальные и теоретические результаты по изучению зависимости коэффициента усиления предметной световой волны  $\gamma$  от ориентационного угла  $\theta$  и толщины  $d$  фоторефрактивного пьезокристалла BGO



а, б — теория без учета пьезоэффекта; в, г — теория с учетом пьезоэффекта; д, е — эксперимент

Рис. 2. Зависимости коэффициента усиления предметной световой волны  $\gamma$  от эффективной толщины кристалла  $d$  при  $\Psi_0 = 0$  и  $90^\circ$

при использовании только одного образца этого кристалла среза  $(\bar{1}, \bar{1}, 0)$  с толщиной  $d_0 = 16$  мм. Показано, что удовлетворительное согласование результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными может быть выполнено лишь с учетом обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов наряду с традиционно рассматриваемыми электрооптическим эффектом и оптической активностью кристалла.

Данный факт должен быть непосредственно принят во внимание при теоретическом определении оптимальных условий взаимодействия в кристалле опорного и предметного световых пучков (например, за счет выбора оптимальных значений  $\theta$ ,  $\Psi_0$  и  $d$ ), при которых

достигается наибольший коэффициент усиления предметной световой волны, что может позволить наиболее эффективно использовать кристалл ВГО в голографических приложениях.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 1.2.01 Государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника»), а также Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части Госзадания на 2016 г. и РФФИ (грант 16-29-14046-офи\_м).

#### Список источников

- [1] **Bortolozzo, U.** Picometer detection by adaptive holographic interferometry / U. Bortolozzo et al. // *Fundamentals of Picoscience*; Editor: K. D. Sattler. — New York: CRC Press, 2014. — P. 3–26.
- [2] **Oliveira, M. E.** Photorefractive moiré-like patterns for the multifringe projection method in Fourier transform profilometry / M. E. Oliveira et al. // *Applied Optics*. — 2016. — Vol. 55. — № 5. — P. 1048–1053.
- [3] **Шандаров, С. М.** Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах / С. М. Шандаров и др. — Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. — 242 с.
- [4] **Шепелевич, В. В.** Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах / В. В. Шепелевич. — Минск: Изд. центр БГУ, 2012. — 254 с.
- [5] **Shamonina, E.** Dynamic holography with none plane waves in sillenites / E. Shamonina et al. // *Optical and Quantum Electronics*. — 1996. — Vol. 28. — № 1. — P. 25–42.
- [6] **Shamonina, E.** Investigation of two-wave mixing in arbitrary oriented sillenite crystals / E. Shamonina et al. // *Applied Physics B*. — 1997. — Vol. 64. — № 1. — P. 49–56.
- [7] **Shamonina, E.** Optical activity in photorefractive  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  / E. Shamonina et al. // *Optics Communications*. — 1998. — Vol. 146. — № 1–6. — P. 62–68.
- [8] **Макаревич, А. В.** Экспериментальное исследование ориентационной зависимости дифракционной эффективности пропускающих голограмм от толщины кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  / А. В. Макаревич и др. // *Письма в ЖТФ*. — 2015. — Том 41. — № 19. — С. 46–54.
- [9] **Шепелевич, В. В.** Экспериментальное исследование зависимости дифракционной эффективности фоторефрактивных голограмм от толщины образца и ориентационного угла в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  среза  $(\bar{1}, \bar{1}, 0)$  / В. В. Шепелевич и др. // *Известия вузов. Физика*. — 2015. — Том 28. — № 10. — С. 74–79.

### Experimental study of the gain dependence on the thickness and orientation angle of a $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ crystal for its effective use in holographic applications

*V. V. Shepelevich<sup>1</sup>, A. V. Makarevich<sup>1</sup>, S. M. Shandarov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> I. P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Mozyr, Belarus

<sup>2</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Experimental studies of the orientation dependence of the object light wave gain on the effective thickness of a sillenite-type photorefractive crystal BGO with thickness 16 mm at a two-wave interaction using only one  $(\bar{1}, \bar{1}, 0)$  -cut crystal sample are performed. It is shown that only taking into account inverse piezoelectric and photoelastic effects it is possible of a satisfactory theoretical interpretation of the experimental data.

**Keywords:** Holographic grating, Photorefractive crystal, BGO, Object light gain, Piezoelectric and photoelastic effects.

#### 4.9. Особенности экспериментальных проверок спектральных характеристик малогабаритного спектрографа на основе вогнутой голограммной дифракционной решётки

К. С. Коренной

<sup>1</sup> АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

Рассмотрены основные особенности измерения параметров «дифракционная эффективность» и «оптическое разрешение» спектрографа с плоским полем на основе вогнутой голограммной дифракционной решётки. Показано, что значение этих параметров имеет сильную зависимость от юстировки дифракционной решётки. Приведена методика, которая позволяет наиболее корректно оценить основные параметры спектрографа.

**Ключевые слова:** Спектрограф, Дифракционная решётка, Разрешающая способность, Дифракционная эффективность.

Спектрографы, а также приборы на их основе, нашли своё применение во многих областях науки и техники, а именно: в медицине, химической промышленности, пищевой промышленности, материаловедении и т. д. На сегодняшний день сложно представить себе экспериментальный анализ состава вещества без использования спектральной аппаратуры. Её основным достоинством является то, что в кратчайшие сроки без использования каких-либо расходных материалов можно контролировать качество продукции, её качественный и количественный состав и многое другое. Основным элементом в спектрографах является дифракционная решётка (ДР) и она определяет большинство основных характеристик спектральной аппаратуры: рабочий спектральный диапазон, оптическое разрешение, дисперсия, уровень рассеянного света, компенсация астигматизма.

В представленной работе рассматривается экспериментальная проверка характеристик малогабаритного спектрографа на основе вогнутой голограммной ДР, описанного в [1]. Стоит отметить, что в оптической схеме спектрографа за счёт выбора параметров пучков записи ДР реализована коррекция aberrаций, повышены чувствительность и разрешающая способность.

Однако при этом возникает сильная зависимость оптического разрешения и дифракционной эффективности от юстировки местоположения ДР, что приводит к необходимости точного измерения этих параметров при её неизменном положении.

Методика юстировки ДР поясняется на рисунке 1. Образец ДР устанавливается в свое посадочное место, а затем поворачивается таким образом, чтобы весь «0» порядок дифракции попал в «ловушку».

Однако не всегда удается отъюстировать ДР таким образом, поскольку положение «0» порядка спектра зависит и от возможных ошибок ДР: отклонение кривизны поверхности от теоретической; погрешности в схеме записи ДР, а также возможные ошибки, которые возникают в результате различных технологических операций, таких как травление фоточувствительного слоя и копирование. В таком случае ДР устанавливается в положении, в котором параметр «оптическое разрешение» соответствует спецификации:

- в диапазоне 250–850 нм: до 4,5 нм;
- в диапазоне 850–90 нм: до 6 нм.

Стоит отметить, что помимо «0» порядка дифракции свое положение меняет и рабочий порядок дифракции, что может привести к уменьшению дифракционной эффективности. На данный момент контроль

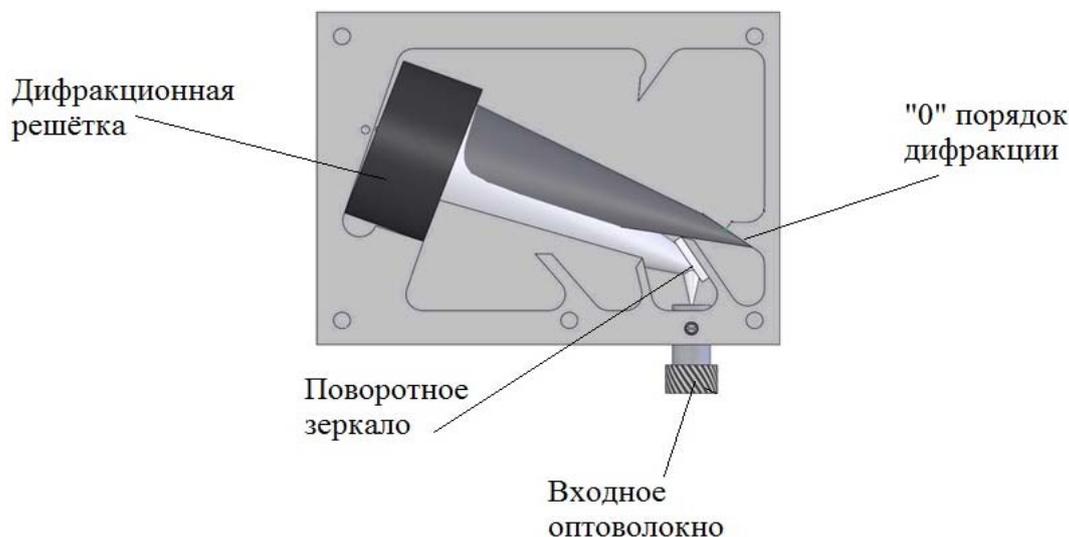


Рис. 1. Юстировка дифракционной решётки

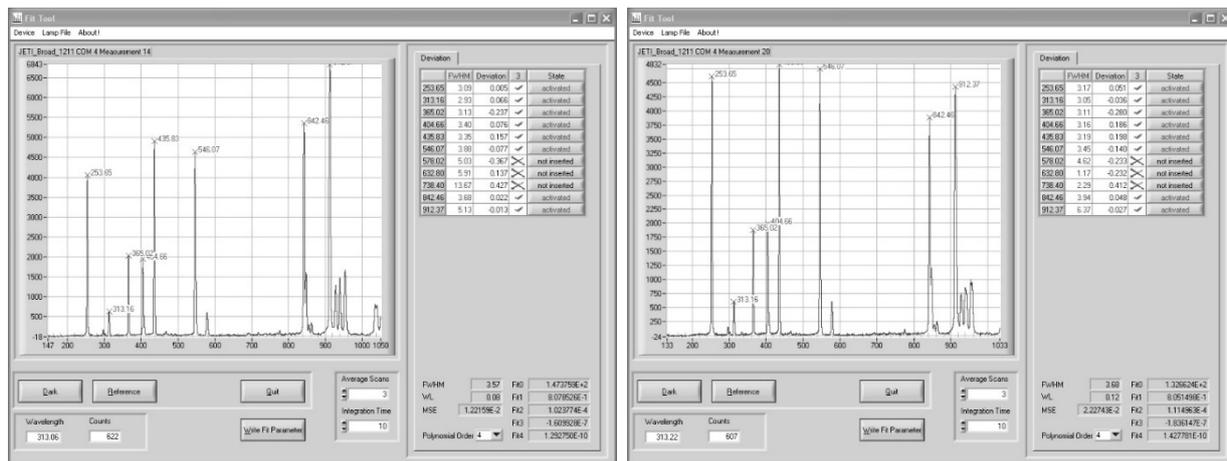


Рис. 2. Значения параметра «оптическое разрешение» в зависимости от положения решётки (ось абсцисс — значение длины волны излучения, ось ординат — значение относительной интенсивности сигнала)

дифракционной эффективности осуществляется на отдельном стенде, оптическая схема которого полностью совпадает с оптической схемой рассматриваемого спектрографа, однако стенд не имеет возможности юстировки местоположения ДР. Поэтому, при установке ДР таким образом, чтобы её оптическое разрешение удовлетворяло требованиям спецификации, следует учесть тот факт, что значение параметра «дифракционная эффективность» может быть значительно меньше требуемого. В связи с этим возникает необходимость разработки методики измерения, которая описывает корректное измерение параметров «оптическое разрешение» и «дифракционная эффективность».

Принцип методики измерения основывается на том, что параметры ДР измеряются на одной установке, при этом её местоположение не меняется от начала и до конца измерений. При нахождении оптимального местоположения ДР, при котором выполняются требования спецификации, представленные выше, значение дифракционной эффективности измеряется на следующих длинах волн: 313, 546 и 912 нм. Данные длины волны относятся к спектральным линиям ртутной лампы, которая используется в качестве источника излучения для проверки параметра «оптическое разрешение». Согласно спецификации, значение дифракционной эффективности не должно быть ниже 35 %, однако остаётся неясным вопрос, какое измерение дифракционной эффективности можно считать эталонным, поскольку при изменении местоположения ДР, даже на малый угол, параметр «разрешающая способность» остаётся в допуске, однако значение дифракционной эффективности меняется, поскольку меняется интенсивность сигнала, пришедшего на приёмник (рисунок 2).

Из рисунка 2 видно, что относительная интенсивность сигнала в УФ и ближнем ИК диапазонах в правой и левой части рисунка отлична друг от друга. Для измерения дифракционной эффективности решёток принято решение измерять относительную интенсивность дифракционных решёток в рабочем порядке дифракции относительно эталонного зеркала, выполненного

на подложке, размеры которой полностью совпадают с размерами подложки ДР.

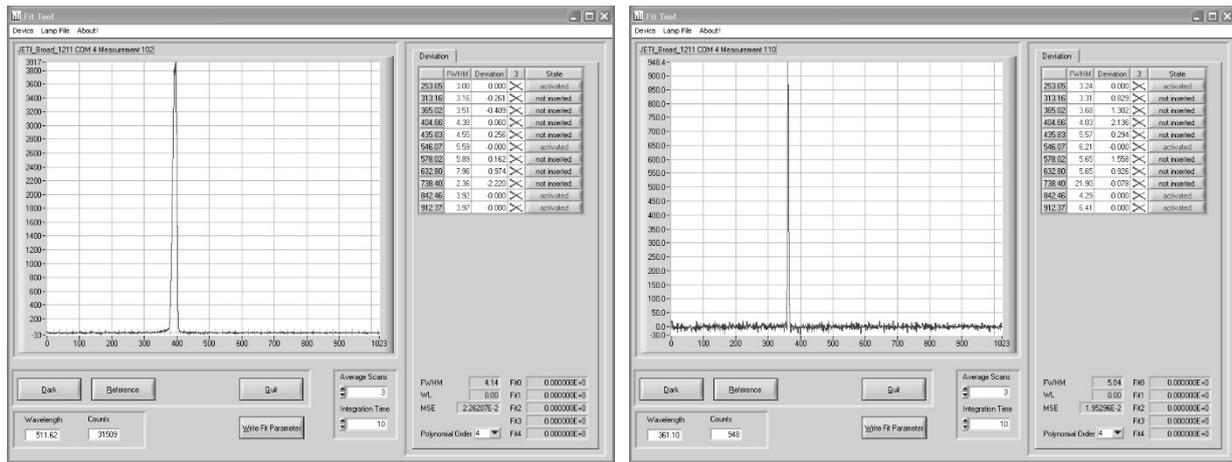
Порядок измерения при этом выглядит следующим образом:

1. Установить эталонное зеркало в спектрограф;
2. С помощью излучателя (монохроматора или лазера) выделить рабочую длину волны;
3. Отъюстировать зеркало таким образом, чтобы излучение, выходящее из оптоволокна (рисунок 1), полностью попадало на фотоприёмник;
4. Для подавления шумов установить после излучателя светофильтр;
5. Измерить относительную интенсивность сигнала;
6. Убрать эталонное зеркало и установить ДР в спектрограф;
7. Заменить излучатель на ртутную лампу;
8. Отъюстировать решётку таким образом, чтобы параметр «оптическое разрешение» соответствовал спецификации;
9. С помощью излучателя (монохроматора или лазера) выделить рабочую длину волны;
10. Для подавления шумов установить после излучателя светофильтр;
11. Измерить относительную интенсивность сигнала;
12. Вычислить дифракционную эффективность решётки по формуле

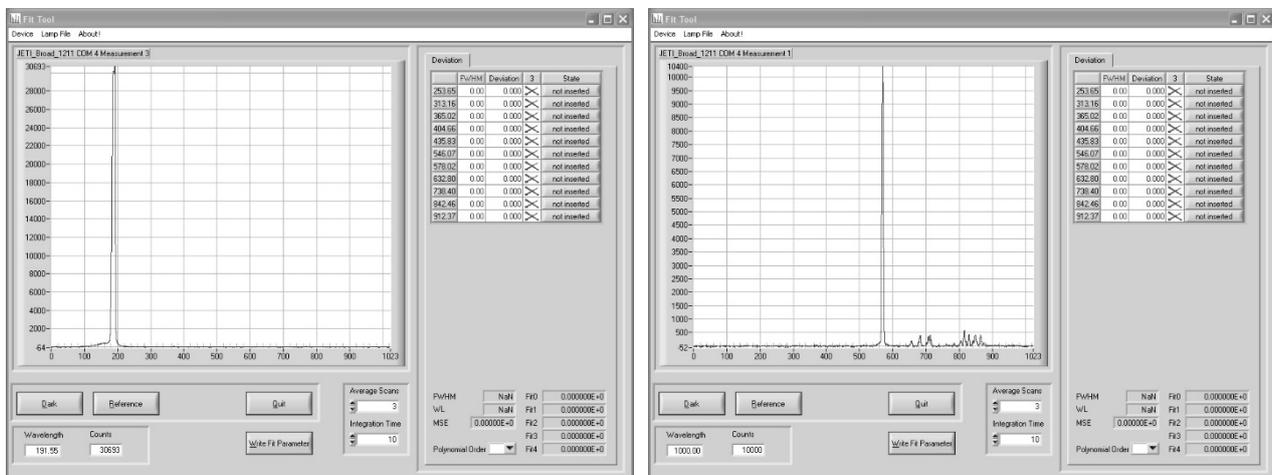
$$D = \frac{I_p}{I_3} 100\%,$$

где  $I_p$  — относительная интенсивность света ДР,  $I_3$  — относительная интенсивность света эталонного зеркала,  $D$  — дифракционная эффективность решётки.

На рисунках 3 и 4 показаны измерения относительной интенсивности сигнала для длин волн лазерных источников излучения, имеющихся в наличии: 457 и 632 нм.



а) эталонное зеркало б) дифракционная решётка  
Рис. 3. К измерению относительной интенсивности сигнала на длине волны 457 нм



а) эталонное зеркало б) дифракционная решётка  
Рис. 4. К измерению относительной интенсивности сигнала на длине волны 632 нм

В АО «НПО «ГИПО» разработана и реализована методика измерения параметров «оптическое разрешение» и «дифракционная эффективность» для вогнутых голограммных дифракционных решёток, которые используются в спектрографе с плоским полем.

При изменении геометрических параметров спектрографа эту методику можно использовать и для решёток с иным радиусом кривизны.

#### Список источников

- [1] **Коренной, К. С.** Малогабаритные спектрографы на основе вогнутых голограммных дифракционных решёток / К. С. Коренной, А. А. Белокопытов, Э. Р. Муслимов, Н. К. Павлычева // Электронный научно-технический журнал «Контенант». — 2015. — № 4. — С. 28–37.

### Features of experimental proofs to define spectral characteristics of small-sized spectrograph based on concave hologram diffraction grating

*K. S. Korennoy<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

<sup>2</sup> Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

The paper presents the main features to measure the “diffraction efficiency” and “resolution ability” of the flat-field spectrograph based on concave hologram diffraction grating. It is shown; the parameter value has a strong dependence on adjustment of diffraction grating. There is a method that allows estimating the main spectrograph parameters more exact.

**Keywords:** Spectrograph, Diffraction grating, Resolution ability, Diffraction efficiency.

#### 4.10. Моделирование интерференционного поля в фотослое на поглощающей подложке

А. Р. Ахметов, А. И. Любимов, А. Р. Шамсутдинов

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

Приведены результаты математического моделирования влияния изменения во времени комплексного показателя преломления фотослоя при экспонировании на форму профиля штриха периодической рельефно-фазовой структуры. Моделирование проводили на основе следующих данных: фоторезист AZ-1350J, толщина слоя фотоматериала в диапазоне 0,33–1,5 мкм, без учета поглощения, при постоянном поглощении, с учетом изменения поглощения в процессе экспонирования.

**Ключевые слова:** Голография, Периодическая рельефно-фазовая структура, Стоячая волна, Комплексный показатель преломления.

При получении периодических рельефно-фазовых (ПРФ) структур в фотослое наряду с основной интерференционной картиной, регистрируемой в объеме фотослоя, присутствуют интерференционные картины, образующиеся при взаимодействии падающих волн, отраженных от границ разделов: фотослой 2 — воздух 1, фотослой 2 — поверхность заготовки 3. В результате распределение интерференционного поля в фоточувствительном слое будет иметь периодический характер рельефа не только вдоль поверхности, но и по глубине фотослоя («стоячая волна»), и будет зависеть от интенсивности, углов падения, поляризации падающих волн, поглощения в фотослое, показателей преломления фотослоя и заготовки. Наличие дополнительных интерференционных картин в слое фоточувствительного материала, обладающего поглощением, приводит к искажению формы профиля штриха при получении ПРФ структуры, что влияет на дифракционные свойства последней.

Для расчета интерференционного поля в объеме слоя фоточувствительного материала нами использовался метод Эйри — суммирование многократных отражений в пленке с последующей суперпозицией амплитуд интерферирующих волн, и закон Бугера — Ламберта — Бера [1].

Использование этого метода позволяет упростить процесс записи интерференции нескольких волн и применить рекуррентные формулы из метода А. Г. Власова [2] при рассмотрении вариантов фотослой — многослойная интерференционная система — заготовка.

Для анализа влияния дополнительных интерференционных картин рассмотрим распределение интенсивности света в фотослое при взаимодействии двух когерентных волн.

Пусть две плоские волны с амплитудами  $E_1, E_2$  падают на поверхность фотослоя под углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , соответственно (Рисунок 1: углы справа от нормали — положительные, а слева — отрицательные). Будем считать векторы поляризации падающих волн ориентированными перпендикулярно плоскости падения и протяженность слоя вдоль координаты  $x$  много больше периода получаемой ПРФ структуры.

В некоторой точке  $P(x, z)$  в начальный момент времени  $t_0$  в фотослое распределение интенсивности  $I(x, z)$  определяется взаимодействием четырех волн:

двух основных с амплитудами  $E_1, E_2$  и двух отраженных от границы 2–3  $E_{1r}$  и  $E_{2r}$ .

Результирующие амплитуды последовательного ряда интерферирующих лучей в точке  $P(x, z)$  фотослоя в некоторый момент времени экспонирования  $t$  можно записать в виде:

1) для прямой волны:

$$E_j(x, z) = A \exp[-\Delta_0(x, z)] \exp[-\varphi_j(x, z)]; \quad (1)$$

2) для отраженной волны:

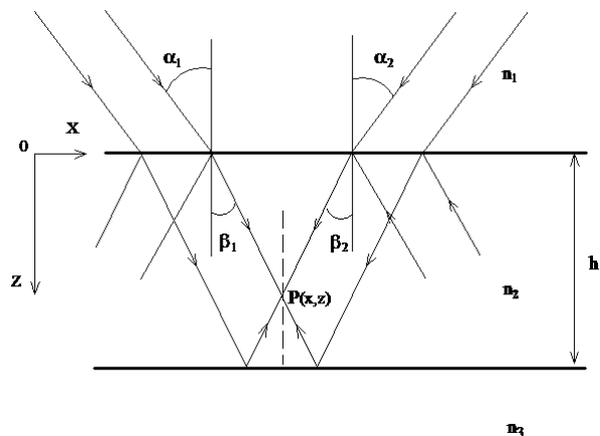
$$E_{jr}(x, z) = A \sqrt{R_{23j}} \exp[-\Delta_j(x, z)] \exp[-\varphi_{jr}(x, z)]; \quad (2)$$

где

$$A = \frac{E_{0j} \sqrt{T_{12j}}}{1 - \sqrt{R_{12j} R_{23j}} \exp(-\Delta_r) \exp(-i\varphi_0)},$$

$$\Delta_j = \int \left[ \chi_\infty + (\chi_0 - \chi_\infty) \exp\left(-s \int_0^t I(x, y, z) dt\right) \right] \frac{dz}{\cos \beta_j}.$$

В соотношениях (1) и (2):  $j$  принимает значения 1, 2 для первой и второй волн соответственно;  $\beta_j = \arcsin(n_1 \sin \alpha_j / n_2)$ ,  $j = 1, 2$ ;  $\alpha_j$  — угол падения в воздухе  $j$ -ой волны;  $R_{12j}$  — коэффициент отражения  $j$ -ой волны на границе 1–2,  $R_{23j}$  — коэффициент отражения  $j$ -ой волны на границе 2–3,  $T_{12j}$  — коэффициент



$n_1$  — показатель преломления воздуха;  $n_2$  — показатель преломления фотослоя;  $n_3$  — показатель преломления заготовки,  $h$  — толщина фотослоя;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — углы падения пучков излучения лазера на фотослой;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — углы падения пучков в фотослое;  $P(x, z)$  — точка наложения волн.

Рис. 1. К выводу формулы интенсивности интерференционной картины в фотослое

пропускания  $j$ -ой волны на границе 1–2,  $z$  — координата точки  $P(x, z)$  по толщине фотослоя; индекс  $r$  обозначает отраженную волну;  $S$  — интегральная светочувствительность фотослоя;  $\chi_\infty$  и  $\chi_0$  — коэффициенты поглощения в фоточувствительном слое при полном экспонировании и без экспонирования соответственно;  $\Delta_r = 2(h - z) \operatorname{tg} \beta_j \sin \alpha_j$  — разность хода пучков волны. Результирующее интерференционное поле в слое фотоматериала можно представить в виде

$$I(x, z) = I_1 \left[ \exp(-2\Delta''_{1z}) + \exp(-2\Delta''_{1z}) \exp(-2\Delta''_{01}) r_{231}^2 \right] + \\ + I_2 \left[ \exp(-2\Delta''_{2z}) + \exp(-2\Delta''_{2z}) \exp(-2\Delta''_{02}) r_{232}^2 \right] + \\ + 2I_1 r_{231} \exp \left[ -(\Delta''_{1z} + \Delta''_{1z} + \Delta''_{01}) \right] \cos \left[ (\Delta'_{1z} - \Delta''_{1z}) - (\Delta'_{01} + \varphi_{231}) \right] + \\ + 2I_2 r_{232} \exp \left[ -(\Delta''_{2z} + \Delta''_{2z} + \Delta''_{02}) \right] \cos \left[ (\Delta'_{2z} - \Delta''_{2z}) - (\Delta'_{02} + \varphi_{232}) \right] + \\ + 2\sqrt{I_1 I_2} \exp \left[ -(\Delta''_{1z} + \Delta''_{2z}) \right] \cos(\Delta\varphi - \psi) + \\ + r_{231} r_{232} \exp \left[ -(\Delta''_{1z} + \Delta''_{2z} + \Delta''_{01} + \Delta''_{02}) \right] \cos \left[ \Delta\Phi' + \Delta'_{12} + (\varphi_{231} - \varphi_{232}) - \psi \right] + \\ + r_{232} \exp \left[ -(\Delta''_{1z} + \Delta''_{2z} + \Delta''_{02}) \right] \cos \left[ (\Delta'_{1z} - \Delta''_{2z}) + (\Delta'_{02} + \varphi_{232}) - \psi \right] + \\ + r_{231} \exp \left[ -(\Delta''_{2z} + \Delta''_{1z} + \Delta''_{01}) \right] \cos \left[ (\Delta'_{1z} - \Delta''_{2z}) + (\Delta'_{01} + \varphi_{231}) - \psi \right]$$
 (4)

где,  $\tau_{12j}$  — комплексная амплитуда пропускания  $j$ -ой волны на границе 1–2;  $r_{12j}$  — комплексный коэффициент отражения  $j$ -ой волны на границе 1–2 или 2–3,  $h$  — толщина фотослоя;  $z$  — координата точки  $P(x, z)$  по толщине фотослоя;  $\Delta''_{zj}$ ,  $\Delta'_{zj}$ ,  $\Delta'_{jz}$  — разность хода  $j$ -ой волны,  $\Delta\Phi'$ ,  $\psi$  — константы.

$$I_j = \tau_{12j}^2 I_{0j} (1 - 2a_j \cos \gamma_j + a_j^2)^{-1} \\ a_j = r_{12j} r_{23j} \exp(-2\Delta''_{0j}) \\ \gamma_j = 2\Delta'_{0j} + \varphi_{21j} + \varphi_{23j} \\ \Delta''_{zj} = \chi \frac{h-z}{\cos \beta_j}, \quad \Delta''_{0j} = \chi \frac{h}{\cos \beta_j} \\ \Delta'_{jz} = k n_2 (\chi \sin \beta_j + z \cos \beta_j) \\ \Delta''_{jz} = k n_2 (\chi \sin \beta_j + (h-z) \cos \beta_j) \\ \Delta'_{0j} = k n_2 h \cos \beta_j$$

Полученное распределение интенсивности интерферирующих волн (5) дает общее представление об интенсивности света в различных точках слоя фотоматериала. Если считать, что толщина фотослоя небольшая ( $\leq 0,2$  мкм) и поглощение в нем мало, то можно пользоваться приближением «тонкого» слоя с постоянным поглощением [3, 4], а различие в освещенности приповерхностных и расположенных на некоторой глубине участков фотослоя будет отличаться только постоянным по величине поглощением.

При получении ПРФ структур толщина слоя фотоматериала обычно выбирается порядка 0,33–1,5 мкм. В этом случае поглощение актиничного света может оказаться значительным. Так поглощение света на длине волны 0,4416 мкм в неэкспонированных слоях фоторезистов СК-17Г и AZ-1350J при толщине 0,4 мкм составляет 20–40 % [5, 6]. Для фоторезистов типа ФП-383 и РН-27 эта величина равна 50–65 % [7], а

$$I(x, z) = (E_1 + E_{1r} + E_2 + E_{2r}) \times (E_1^* + E_{1r}^* + E_2^* + E_{2r}^*). \quad (3)$$

Проводя несложные алгебраические преобразования и переходя к интенсивностям, имеем слагаемые вида  $E_j E_j^*$  и  $E_{jr} E_{jr}^*$ , которые создают однородную засветку в объеме фотослоя при наличии поглощения, остальные слагаемые вида  $E_i E_j^* + E_j E_i^*$  и  $E_{jr} E_{ir}^* + E_{ir} E_{jr}^*$  отвечают за образование основной и дополнительных интерференционных картин. Из этого следует уравнение (4):

для неорганических фоторезистов при толщинах 0,8–1,0 мкм — более 70 % [8, 9] в зависимости от предварительной обработки (технологии приготовления фотослоя и его нанесения) и длины волны экспонирования. Свойства фоторезистов зависят от дозы облучения, т. е. экспозиции. В свою очередь, от экспозиции зависит линейный коэффициент поглощения фотоматериала, так как в процессе экспонирования происходит либо фотохимическая реакция с образованием новых веществ [10, 7], либо фотоструктурная перестройка [8, 9]. Другими словами, поглощение света в слое фотоматериала при экспонировании актиничным излучением будет меняться во времени и зависеть от глубины фотослоя  $h$ .

Рассмотрим процесс изменения линейного показателя поглощения, считая, что экспонирование фотослоя является одноквантовым процессом [10, 5]. Концентрация светочувствительных центров  $M(x, z, t)$  в точке  $P(x, z)$  в момент времени  $t$  определяется как [5]:

$$\frac{\partial M(x, z, t)}{\partial t} = -SM(x, z, t), \quad (5)$$

где  $S$  — дифференциальная светочувствительность;

$$H(x, z, t) = \int_0^t I(x, z, t) dt \quad \text{— экспозиция фотослоя в точке}$$

$P(x, z)$ ;  $t$  — текущее время экспозиции.

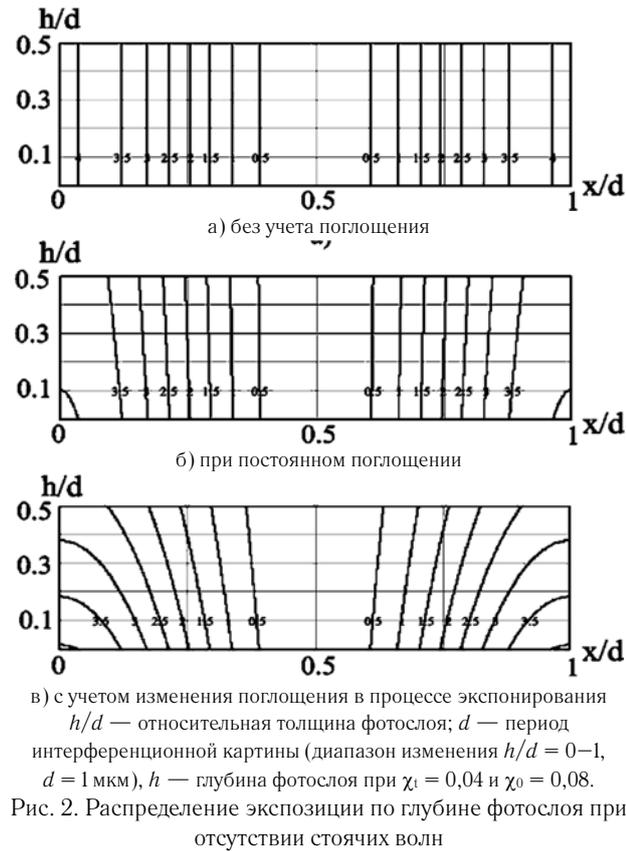
Тогда, из (5) имеем

$$M(x, z, t) = \exp[-SH(x, y, t)]. \quad (6)$$

Учитывая, что линейный коэффициент поглощения  $\chi(x, z, t)$  в любой точке  $P(x, z)$  в момент времени  $t$  определяется как

$$\chi(x, z, t) = \chi_1 + (\chi_0 - \chi_1) M(x, z, t) \quad (7)$$

и подставляя (6) в (7), имеем закон изменения линейного коэффициента поглощения  $\chi(x, z, t)$  от экспозиции



$$\chi(x, z, t) = \chi_1 + (\chi_0 - \chi_1) \exp \left[ -S \int_0^t I(x, z, t) dt \right]. \quad (8)$$

Поскольку поглощение  $\chi$  является функцией экспозиции фотослоя, то комплексный показатель преломления среды в каждой точке объема фотослоя будет изменяться в процессе экспонирования.

С учетом (8) получим конечное выражение для расчета распределения интенсивности в фоточувствительном слое в процессе экспонирования, заменив в (4)  $\Delta''_{0j}$ ,  $\Delta''_{zj}$ ,  $\Delta''^*_{zj}$  на:

$$\begin{aligned} \Delta''_{0j} &= \int_0^h \left( \chi_1 + (\chi_0 - \chi_1) \exp \left( -S \int_0^t I(x, z, t) dt \right) \right) \frac{dz}{\cos \beta_j}, \\ \Delta''_{zj} &= \int_0^z \left( \chi_1 + (\chi_0 - \chi_1) \exp \left( -S \int_0^t I(x, z, t) dt \right) \right) \frac{dz}{\cos \beta_j}, \\ \Delta''^*_{zj} &= \int_z^h \left( \chi_1 + (\chi_0 - \chi_1) \exp \left( -S \int_0^t I(x, z, t) dt \right) \right) \frac{dz}{\cos \beta_j}. \end{aligned} \quad (9)$$

Зависимость (9) представляет собой нелинейное уравнение, которое нельзя разрешить относительно  $I(x, z, t)$  в аналитическом виде. Поэтому для вычисления  $I(x, z, t)$  используем итерационный метод в диапазоне от 0 до 10 секунд.

Для начального момента времени  $t = 0$ ,  $H(x, z, 0) = 0$  из (9) при  $\chi = \chi_0$  получаем  $I(x, z, 0)$ . По начальному значению  $I(x, z, 0)$  вычисляем экспозицию  $H(x, z, \delta\tau)$  через малый момент времени  $\delta\tau$ . Используя

это значение экспозиции, вычисляем  $I(x, z, \delta\tau)$ . По полученным значениям распределения интенсивности вычисляем новое значение экспозиции за следующий момент времени  $\delta\tau$  и т. д., то есть:

$$H(x, z, T_3) = \sum_{i=0}^N (\delta H_i). \quad (10)$$

$$\delta H_{i-1} = I(x, z, i\delta t) \delta t. \quad (11)$$

$$T_3 = N\delta t. \quad (12)$$

Процесс итерационных вычислений завершаем при заданном времени экспозиции  $T_3$ .

Таким образом, из (10) получаем конечное (к моменту времени  $T_3$ ) распределение экспозиции по глубине фотослоя. На основе (9) — (12) нами разработан алгоритм расчета распределения экспозиции. На рисунке 2 приведены распределения экспозиции при одинаковом времени экспонирования по глубине фотослоя: а) без учета поглощения, б) при постоянном поглощении, в) с учетом изменения поглощения в процессе экспонирования.

Формулы (11) и (12) позволяют найти искомое распределение  $H(x, z, t)$ , исходя из распределения интенсивности  $I(x, z, 0)$ . Полученное распределение экспозиции  $H(x, z, T_3)$  с помощью характеристических кривых для скорости проявления можно пересчитать в распределение скоростей проявления  $V_{пр}(x, z)$ . Тогда по известному распределению скоростей проявления  $V_{пр}(x, z)$  в объеме фотослоя для момента времени  $T_{пр}$  можно вычислить форму профиля штриха ПРФ структуры, образующуюся в результате проявления.

Фронт проявления  $Z(x, z, t)$  движется вглубь слоя неравномерно и имеет на различных участках разную кривизну, связанную с распределением  $H(x, z, T_3)$ , при этом скорость проявления будет направлена перпендикулярно фронту проявления  $Z(x, z, t)$  в данной точке. Тогда для некоторого момента времени  $t$  приращение  $dZ(x, z, t)$  можно представить в виде [5]:

$$dZ(x, z, t) = V_{пр}(x, z) \sqrt{1 + \left( \frac{\partial Z(x, z, t)}{\partial x} \right)^2} dt. \quad (13)$$

Уравнение (13) позволяет вычислить глубину проявления фотослоя при формировании ПРФ структуры для заданных начальных условий  $Z(x, z, 0) = f(x, z)$ . При вычислении формы профиля штриха, получаемой в процессе проявления ПРФ структуры, согласно (13) необходимо использовать не линии постоянной экспозиции, а линии постоянной скорости проявления, которые соответствуют направлению движения фронта проявления.

Далее представлены результаты численного расчета распределения экспозиции по глубине фотослоя при получении ПРФ структуры для различных условий голографирования. При этом параметры фотослоя считаем постоянными (т. е. условия получения и предварительной обработки пленки фотослоя одинаковые).

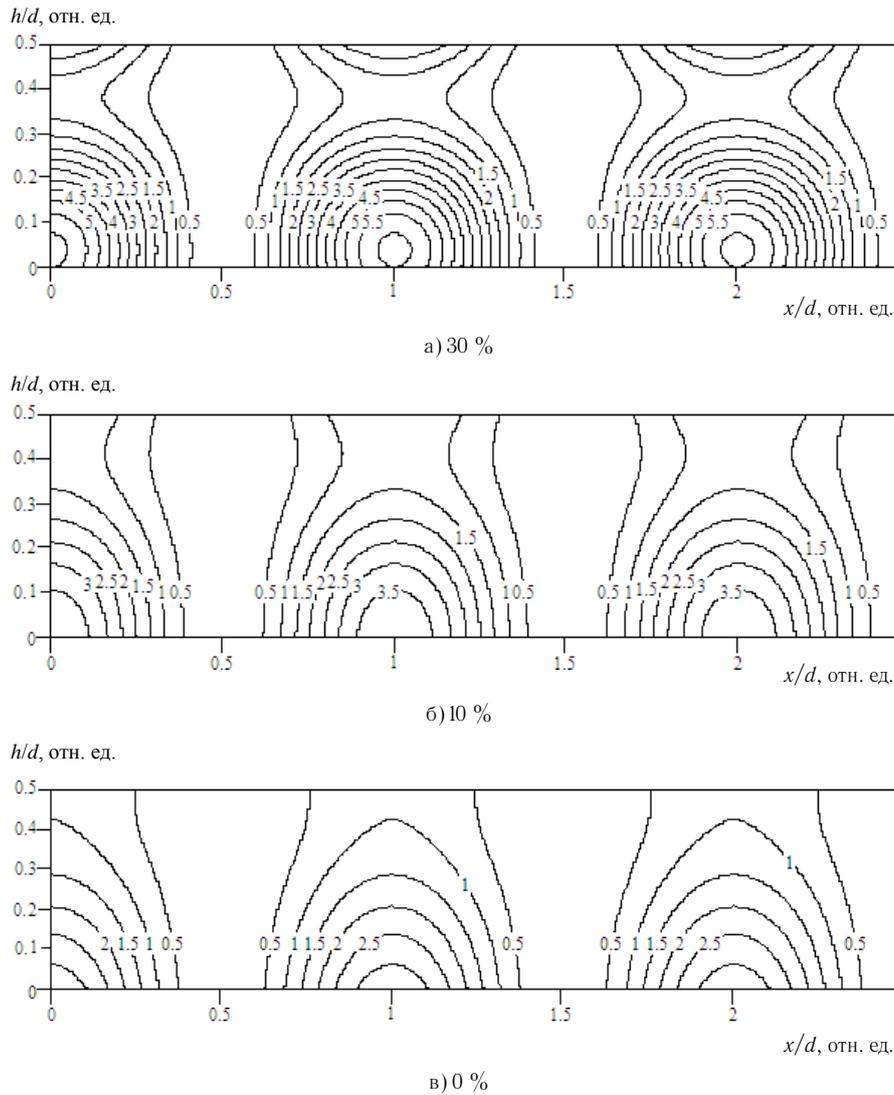


Рис. 3. Распределение экспозиции по глубине фотослоя при разных коэффициентах отражения на границе фотослой — заготовка (симметричная схема регистрации ПРФ структуры в конаправленных пучках)

Для анализа влияния поглощения на образование формы профиля штриха рассмотрим случай, реализуемый на практике, когда углы падения интерферирующих волн приблизительно равны по абсолютной величине (симметричный случай) и, как следствие, равны амплитудные коэффициенты пропускания и отражения интерферирующих волн, а векторы поляризации последних перпендикулярны плоскости падения.

Распределение экспозиции по глубине фотослоя с учетом влияния поверхностей 1–2 и 2–3 (рисунок 1) приведены на рисунке 3. Появляется дополнительная поперечная модуляция в фотослое, вызванная отраженными волнами, увеличивающаяся с ростом показателя преломления  $n_3$ . На рисунке 3 приведены результаты расчета распределения экспозиции по глубине фотослоя (влияние поверхности фотослой — заготовка не учитывается): без учета поглощения, при постоянном поглощении и с учетом изменения поглощения в процессе экспонирования фотослоя. В предположении линейности процесса проявления распределение из рисунка 3а приведет к образованию синусои-

дальной формы профиля штриха, распределение из рисунка 3б к симметричной, близкой к синусоидальной. Изменение комплексного показателя преломления фотослоя в процессе экспонирования (рисунок 3в) приводит к более сильному «искривлению» линий постоянной экспозиции по сравнению со случаем постоянного поглощения, что даже в случае линейности процесса проявления будет приводить к образованию формы профиля штриха ПРФ структуры, отличной от синусоидальной.

### Заключение

Разработана методика математического моделирования процесса формирования ПРФ структур в фоточувствительном слое с учетом изменения комплексного коэффициента поглощения в процессе экспонирования.

Рассмотрена модель образования формы профиля штриха при проявлении рельефно-фазового фотоматериала и разработан алгоритм для расчета контура проявления, позволяющий рассчитывать формы профиля штриха ПРФ структур.

#### Список источников

- [1] **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. — М., 1973. — 585 с.
- [2] **Крылова, Т. Н.** Интерференционные покрытия / Т. Н. Крылова. — Л.: Машиностроение, 1973. — 224 с.
- [3] **Austin, S.** Fabrication of thin periodic structures in photoresist: a model / S. Austin, F. T. Stone // *Applied Optics*. — 1976. — Vol. 15. — P. 1071–1074.
- [4] **Machev, L.** Formation of holographic diffraction gratings in photoresist / L. Machev, S. Tochev // *Appl. Phys.* — 1981. — Vol. 26. — P. 143–149.
- [5] **Березин, Г. Н.** расчет профилей проявления фоторезиста / Г. Н. Березин, А. В. Никитин, Р. А. Сурис // *Электронная техника; Серия 3. Микроэлектроника*. — 1974. — Том 2. — № 50. — С. 40–42.
- [6] **Dill, F. H.** Characterization of positive photoresist / F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge, J. M. Shaw // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 1975. — Том 22. — № 7. — 445–452 с.
- [7] **Боков, Ю. С.** Фото-, электроно- и рентгено- резисты / Ю. С. Боков — М.: Радио и связь, 1982. — 53 с.
- [8] **Герке, Р. Р.** Свойства голографических решеток на пленках сульфида мышьяка / Р. Р. Герке, С. Б. Мамедов, М. Д. Михайлов, И. Ю. Юсупов, О. А. Яковук // *Успехи научной фотографии*. — М.: Наука, 1990. — Том 14. — С. 52–55.
- [9] **Антонова, Т. Б.** О некоторых особенностях тонких пленок селенидов мышьяка и изготовление г. д. р. на их основе / Т. Б. Антонова, М. Н. Астафьева, И. А. Кожина, А. И. Любимов, Ф. А. Саттаров // VI Всесоюзная конференция по голографии: г. Витебск: Сборник тезисов. — 1990. — С. 38.
- [10] **Гордон, А. Г.** Фотографические характеристики позитивных фоторезистов на основе О-нафтохинондиазидов / А. Г. Гордон, Ю. С. Боков // *Электронная техника: Материалы*. — 1971. — Том 6. — № 5. — С. 36–40.

### Simulation of interference field within photosensitive layer deposited on absorbing substrate

*A. R. Akhmetov, A. I. Lubimov, A. R. Shamsutdinov*

Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

The paper presents the results of mathematical simulation to affect time change of complex index of photosensitive layer's refraction by writing on groove profile shape of periodical relief phase structure. Simulation was conducted under the following conditions: photosensitive resist is AZ-1350J, layer thickness of photomaterial is 0.33–1.5  $\mu\text{m}$ . As well as the simulation was conducted by three variants: without regard to absorption, under constant absorption, allowing for alteration of absorption by writing.

**Keywords:** Holography, Periodical relief phase structure, Standing wave, Complex index of refraction.

#### 4.11. Варианты оптической схемы светосильного изображающего спектрографа с выпуклой голограммной решеткой

А. Н. Мельников<sup>1</sup>, Э. Р. Муслимов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

<sup>3</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, LAM, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Marseille, France

В данной статье рассматриваются варианты оптической схемы светосильного изображающего спектрографа на основе использования выпуклой голограммной дифракционной решетки с коррекцией aberrаций, и анализируются полученные зависимости качества изображения этого спектрографа и стрелки прогиба поверхности решетки от изменения входной числовой апертуры. В качестве исходной точки при расчете подобной оптической схемы используется проекционный объектив. Показано, что при использовании простейшего объектива типа триплет можно построить схему спектрографа для видимого диапазона спектра 400–700 нм с относительным отверстием до 1:2,3, обеспечивающего спектральное разрешение 2,9–7,7 нм при работе с щелью высотой 16 мм. Также рассмотрен вариант построения спектрографа с совмещением спектрального и изображающего каналов на основе б-линзового проекционного объектива.

**Ключевые слова:** Голограммные дифракционные решетки, Выпуклые дифракционные решетки, Изображающий спектрограф, Спектральное разрешение.

##### Введение

Высокое пространственное разрешение является распространенным требованием к современным дифракционным спектральным приборам [1]. Коррекция aberrаций по высоте входной щели необходима в изображающих гиперспектральных приборах, используемых для задач дистанционного зондирования [2, 3], биомедицинских исследований [4], атомно-абсорбционной спектроскопии [5] и др., а также в многоканальных устройствах, например, в спектральных приборах, работающих с распределенной сетью датчиков [6, 7]. Значительная часть приборов подобного класса использует пропускающие дифракционные решетки или гризмы, работающие совместно с коллимирующими и камерными объективами [8]. Например, как показано в [9], можно получить простую и компактную схему спектрографа с коррекцией aberrаций вдоль входной щели при использовании неклассической дифракционной решетки, выполненной на сферической поверхности. Однако подобная схема строилась за счет внесения дополнительного оптического элемента — пропускающей дифракционной решетки, выполненной на ахроматическом мениске. Такой подход может усложнить конструкцию спектрографа и уменьшить его пропуска-

ние. В настоящей статье мы рассматриваем возможность построения изображающего спектрографа путем нанесения дифракционной решетки на одну из линз проекционного объектива. При этом описан наиболее сложный с технологической точки зрения вариант — расположение решетки на выпуклой поверхности со значительной стрелкой прогиба. Как правило, в таком случае неклассическая решетка не может быть изготовлена методом механической нарезки, однако легко может быть выполнена с помощью голографической записи [10].

##### 1. Оптическая схема изображающего спектрографа

В качестве примера рассмотрим оптическую схему изображающего спектрографа на базе трехлинзового объектива. Спектрограф работает в видимом диапазоне спектра 400–700 нм, числовая апертура на входе равна 0,14. Входная щель имеет ширину 100 мкм и высоту 16 мм. Линейное увеличение составляет — 1,03<sup>x</sup>. В качестве исходной точки при оптимизации использована широко известная схема триплета Кука [11]. На второй, выпуклой, поверхности последней линзы нанесена голограммная дифракционная решетка (ГДР) с коррекцией aberrаций. Общий вид оптической схемы

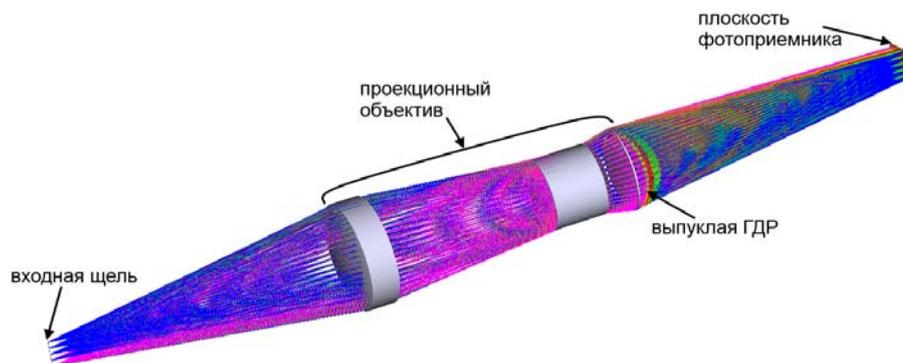
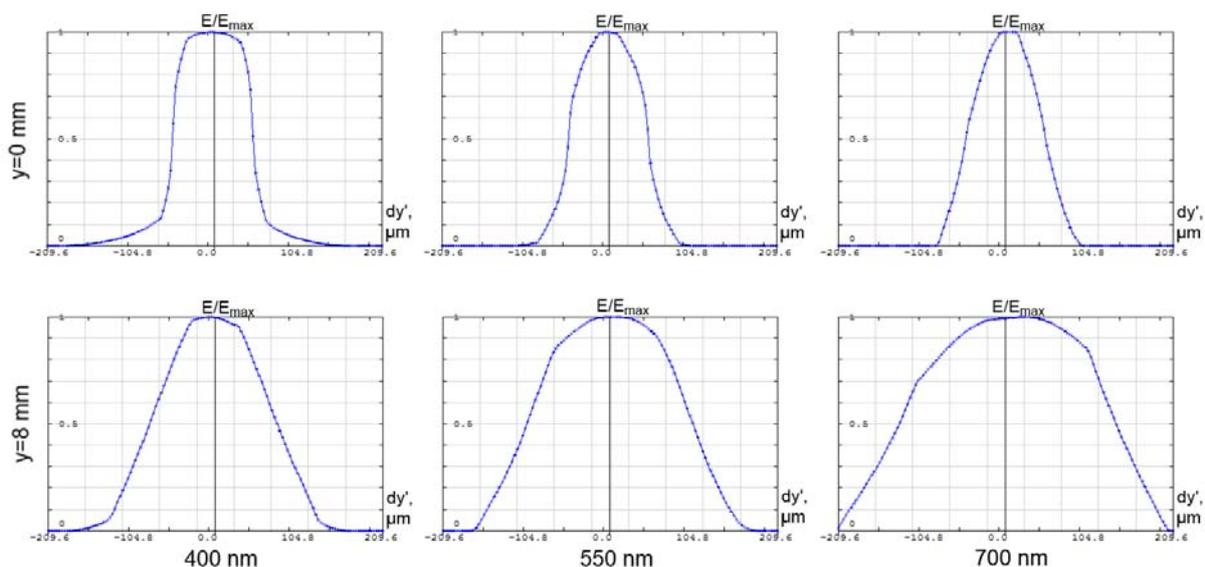
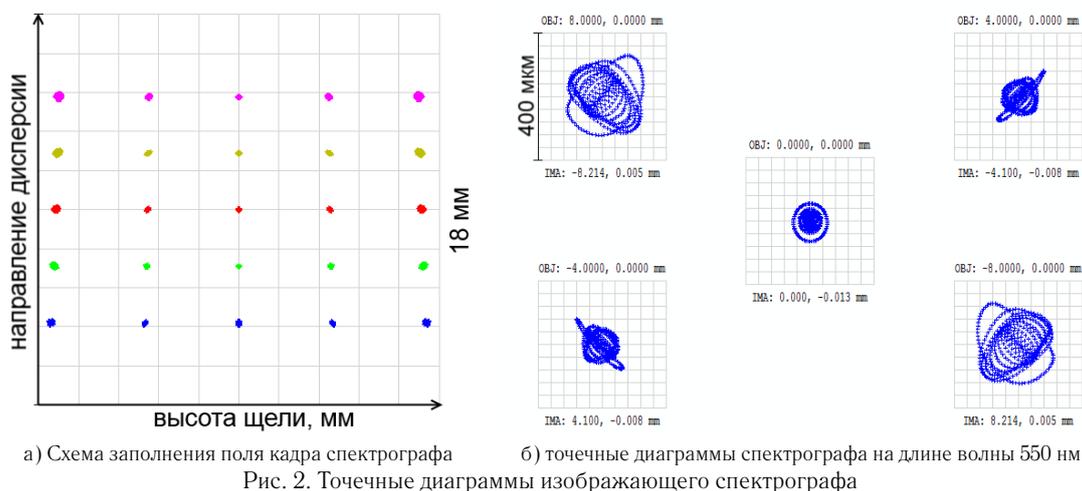


Рис. 1. Оптическая схема изображающего спектрографа



представлен на рисунке 1. Общая длина схемы составляет 338 мм.

Дифракционная решетка имеет частоту штрихов в центре  $202,1 \text{ мм}^{-1}$ . Поверхность ГДР при световом диаметре 48,7 мм имеет стрелку прогиба 5,5 мм.

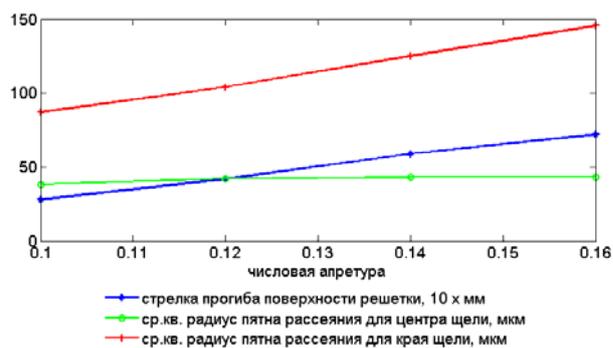
Для оценки качества изображения спектрографа, в первую очередь — коррекции aberrаций вдоль входной щели, на рисунке 2 приведены точечные его диаграммы. Для определения спектрального разрешения спектрографа были рассчитаны его аппаратные функции (АФ). Графики АФ, рассчитанные для разных длин волн и точек поля зрения, приведены на рисунке 3.

Таблица 1. Спектральное разрешение изображающего спектрографа

Длина волны, нм	Линейный предел разрешения, мкм (Спектральное разрешение, нм) $y = 0 \text{ мм}$	Линейный предел разрешения, мкм (Спектральное разрешение, нм) $y = 8 \text{ мм}$
400	102,4 (3,0)	156,8 (4,5)
550	100,0 (2,9)	208,0 (6,0)
700	100,0 (2,9)	268,8 (7,7)

Длина изображения спектра на приемнике составляет 10,4 мм, следовательно, обратная линейная дисперсия равна  $28,79 \text{ нм/мм}$ . Значения спектрального разрешения, полученные с учетом данной величины, а также данные о линейном пределе разрешения, сведены в таблице 1.

Приведенные данные демонстрируют, что рассчитанная схема позволяет получить достаточно высокое



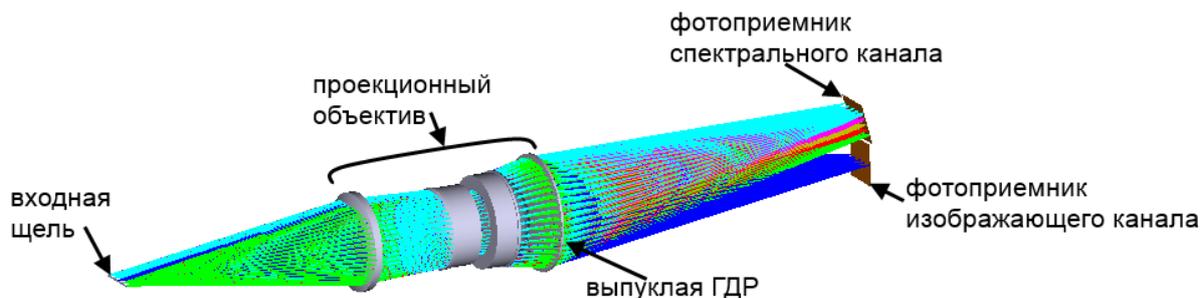


Рис. 5. Оптическая схема спектрографа с совмещением каналов

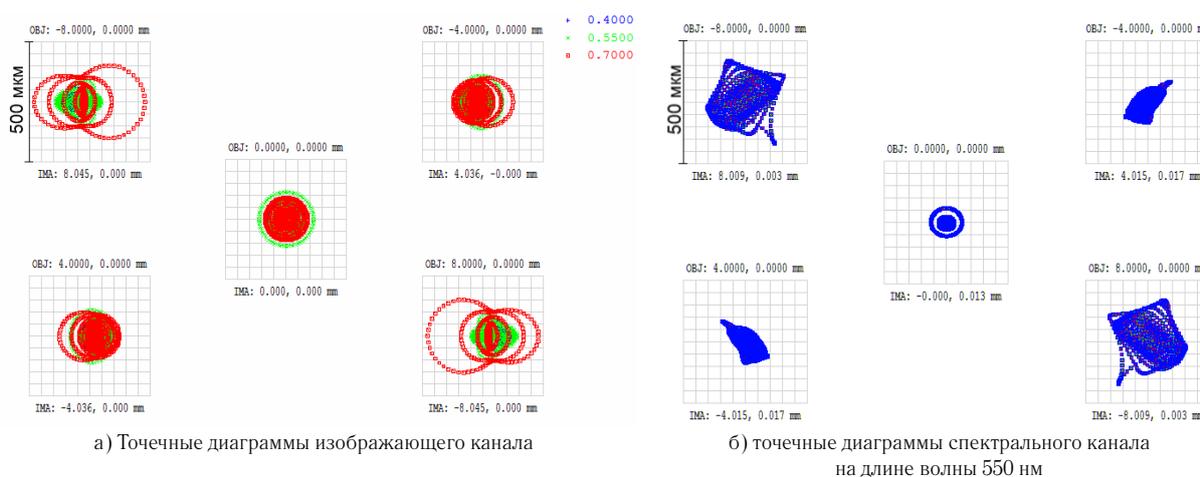


Рис. 6. Точечные диаграммы спектрографа с совмещением каналов

спектральное разрешение для различных точек и при этом разделять спектры по высоте щели.

Однако качество изображения на краю щели заметно снижается. Очевидно, оно также зависит от апертуры схемы. Для проверки данной зависимости была проведена численная оптимизация схемы при разных значениях числовой апертуры на входе. Из расчетов видно (рисунок 4), что для интервала значений апертуры, представляющего практический интерес, радиус пятна рассеяния для центра щели изменяется незначительно, в то время как соответствующее значение для края щели возрастает почти линейно. Аналогично, стрелка прогиба поверхности решетки возрастает практически линейно. Полученные значения стрелки прогиба не представляют сложности для голографической технологии изготовления дифракционных решеток. Соответственно, схема остается практически реализуемой для различных значений апертуры и ограничением ее использования является качество изображения на краю поля зрения.

## 2. Оптическая схема спектрографа с совмещением каналов

При решении ряда задач важно регистрировать как спектр излучения наблюдаемого объекта, так и его изображение. Одновременная регистрация двух изображений позволяет идентифицировать источники из-

лучения [12], вводить коррекцию измерений при гиперспектральной съемке [13]. Два канала, решающие эти задачи, могут быть оптически сопряжены, как показано в [14] и [15].

Аналогичное комплексирование можно реализовать в схеме, подобной описанной выше. В нулевом порядке дифракции решетки можно зарегистрировать неразложенное изображение объекта (поскольку схема изначально строится на базе проекционного объектива, такое изображение может быть достаточно высокого качества). Отметим, что на практике совместная оптимизация двух каналов требует большего числа свободных коррекционных параметров, поэтому удовлетворительных результатов удастся достичь только при использовании относительно сложных объективов.

Рассмотрим схему спектрографа с совмещением спектрального и изображающего каналов на основе двойного объектива Гаусса [16]. Рабочий диапазон и размеры входной щели оставлены без изменений. Числовая апертура увеличена до 0,15. Общий вид схемы приведен на рисунке 5 (длина схемы составляет 239 мм).

Дифракционная решетка имеет частоту штрихов в центре  $227,1 \text{ мм}^{-1}$ . Световой диаметр равен 49,9 мм, а стрелка прогиба — 5,7 мм.

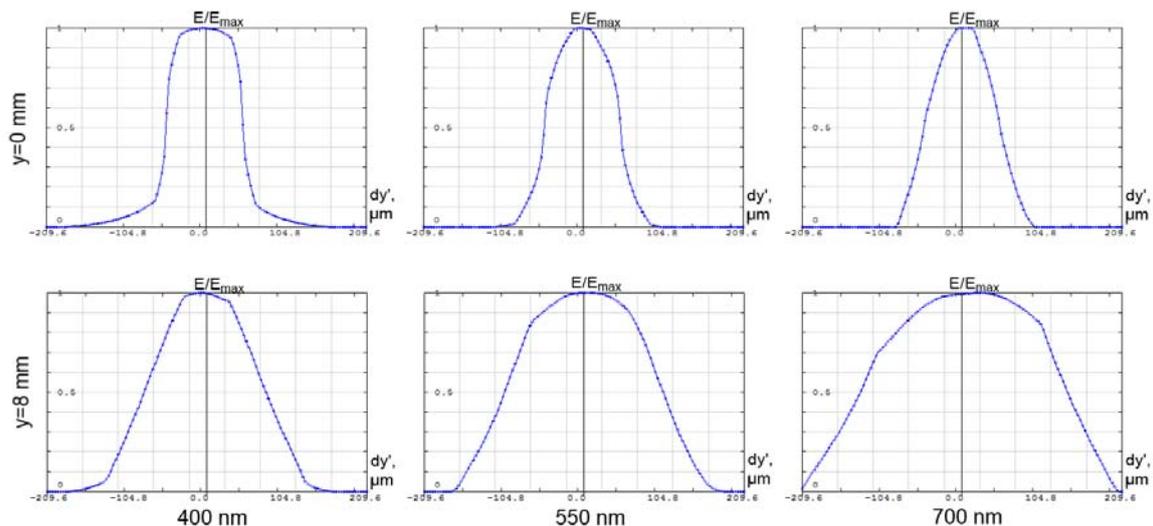


Рис. 7. Аппаратные функции спектрографа с совмещением каналов для входной щели шириной 100 мкм

Таблица 2. Спектральное разрешение спектрографа с совмещением каналов

Длина волны, нм	Линейный предел разрешения, мкм	Линейный предел разрешения, мкм
	(Спектральное разрешение, нм) $y = 0$ мм	(Спектральное разрешение, нм) $y = 8$ мм
400	169,6 (5,1)	240,0 (7,2)
550	102,4 (3,1)	240,0 (7,2)
700	100,0 (3,0)	294,4 (8,8)

Аналогичным образом, для демонстрации достигаемого качества изображения приведены точечные диаграммы (рисунок 6).

АФ спектрографа представлены на рисунке 7. В данном случае при длине изображения спектра 10 мм обратная линейная дисперсия составляет 30,06 нм/мм. Значения спектрального разрешения, вычисленные по АФ, указаны в таблице 2.

Результаты вычислений показывают, что в схеме обеспечено достаточно высокое качество изображения в обоих каналах.

## Заключение

В настоящей статье представлено два варианта схемы изображающего спектрографа с пропускающей голограммной решеткой, нанесенной на выпуклой поверхности. Показано, что при размещении такой решетки на поверхности последней линзы в существующей схеме проекционного объектива можно получить простую и компактную схему, обеспечивающую сравнительно высокое спектральное разрешение для увеличенной высоты входной щели. При этом, в случае использования достаточного числа свободных коррекционных параметров при оптимизации схемы, можно обеспечить регистрацию неразложенного изображения объекта с достаточно высоким разрешением.

Показано, что в схеме, построенной по такому принципу, можно достичь значение спектрального разрешения до 2,9 нм в видимом спектральном диапазоне 400–700 нм при высоте входной щели 16 мм и числовой апертуре до 0,15.

## Список источников

- [1] **Хасан, М.** Оптические схемы малогабаритных спектрографов на основе вогнутых отражательных голограммных дифракционных решеток для исследования наноматериалов: Автореф. канд. техн. наук: 05.11.07 / М. Хасан. — Казань, 2012. — 22 с.
- [2] **Ху, L.** Optical design of wide waveband compact imaging spectrometer with fast speed / L. Xu, Y. Ji, W. Shen, M. Tang // International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Imaging and Processing Technology: Proceedings of SPIE. — 2011. — Vol. 8200. — P. 82000C.
- [3] **Kudenov, M. W.** Faceted grating prism for a computed tomographic imaging spectrometer / M. W. Kudenov, J. Craven-Jones, R. Aumiller, C. Vandervlugt, E. L. Dereniak // Optical Engineering. — 2012. — Vol. 51. — № 4. — P. 044002.
- [4] **Peyrot, D.** Development of a nonlinear fiber-optic spectrometer for human lung tissue exploration / D. A. Peyrot et al. // Biomedical Optics Express. — 2012. — Vol. 3. — № 5. — P. 840853.
- [5] **Gilmutdinov, A. Kh.** Spatially resolved atomic absorption spectrometry / A. Kh. Gilmutdinov, A. V. Voloshin, K. Yu. Nagulin // Russian Chemical Reviews. — 2006. — Vol. 75. — № 4. — P. 303–315.
- [6] **Pawluczyk, O.** Applications of multichannel imaging spectrometer / O. Pawluczyk, R. Pawluczyk // Photonics North 2004: Photonic Applications in Astronomy, Biomedicine, Imaging, Materials Processing, and Education. Proceedings of SPIE. — 2004. — Vol. 5578. — P. 227–238.
- [7] iHR550 Imaging Spectrometer [Electronic resource] / HORIBA, Ltd. — Electronic data. — [Longjumeau Cedex, France] cop. 2013. — Mode of Access: <http://www.horiba.com/scientific/products/optical-spectroscopy/spectrometers-monochromators/ihr/ihr550-imaging-spectrometer-200/>, free. — Title of screen. — Lang. eng. — (Usage date: 6.10.2013).

- [8] Holographic f/1.8 holographic imaging spectrograph [Electronic resource] / Kaiser Optical Systems, Inc. — Electronic data. — [Ann Arbor MI, USA] cop. 2011. — Mode of Access [http://www.kosi.com/Raman\\_Spectroscopy//imagingspectrographs](http://www.kosi.com/Raman_Spectroscopy//imagingspectrographs), free. — Title of screen. — Lang. eng. — (Usage date: 6.10.2013).
- [9] **Муслимов, Э. Р.** Изображающий спектрометр с гризмой в сходящемся пучке лучей / Э. Р. Муслимов, Р. Р. Ахметгалеева // X Междунар. конф. «Оптические технологии в телекоммуникациях–2012», Уфа, 20–22 ноября 2012: Материалы конференции. — Уфа: УГАТУ, 2012. — С. 67–69.
- [10] **Муслимов, Э. Р.** Дифракционные решетки в составе базового модуля гиперспектрометра с высоким пространственным разрешением для ближнего ИК-диапазона / Э. Р. Муслимов, А. Р. Насыров, А. Ф. Скочиллов / Голография. Наука и практика. Сб. трудов 12-й Междунар. конф. «ГолоЭкспо–2015». Казань, 12–15 октября 2015 г. — Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2015. — С. 360–362.
- [11] **Патент № 2 503 751 A US.** Photographic objective of the Cooke triplet type / G. H. Aklin, F. E. Altman, L. Walter. — Оpubл. 11.04.1950.
- [12] **Hill, G.** Volume phase holographic gratings for infrared and optical spectrographs / G. J. Hill, M. J. Wolf, J. R. Tufts, E. C. Smith // Specialized Optical Developments in Astronomy: Proceedings of SPIE. — 2003. — Vol. 4842. — P. 1.
- [13] **Орлов, А. Г.** Авиационный гиперспектрометр: архитектура и методика расчета элементов / А. Г. Орлов, В. В. Егоров, А. П. Калинин, И. Д. Родионов // 5-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — М.: ИКИ РАН, 2007. — С. 280–287.
- [14] **Zubko, N.** Method to reconstruct exoplanetary spectrum / N. Zubko, N. Baba, H. Shibuya, N. Murakami // Optics Letters. — 2009. — Vol. 34. — № 16. — P. 2432–2434.
- [15] **Muslimov, E. R.** A built-in spectrograph with transmission concave holographic grating / E. R. Muslimov // Proceedings of 3rd EOS Conference on Manufacturing of Optical Components (EOSMOC 2013), Munich, May 13–15, 2013. — EOSMOC2013\_1569714597\_005.
- [16] **Патент № 2005 088 377 A2 WO.** Double-gauss type of lens for compact camera / R. L. Thompson, J. Tesar. — Оpubл. 22.09.2005.

## Versions of a high-aperture imaging spectrograph optical scheme with a convex hologram grating

*A. N. Melnikov<sup>1</sup>, E. R. Muslimov<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

<sup>2</sup> Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

<sup>3</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, LAM, Laboratoire d’Astrophysique de Marseille, Marseille, France

The paper presents the variations of optical schemes of high-aperture imaging spectrograph based on use of convex hologram diffraction grating having aberration correction as well as there is an analysis of received dependence of image quality of the spectrograph and height increment of grating surface on change of input numerical aperture. A projection lens is used as the starting point for design of such an optical scheme. It is shown that by use of the simplest triplet-type lens, it is possible to construct an optical scheme of spectrograph for the visible spectral range 400–700 nm with relative aperture up to 1:2.3, which provides spectral resolution of 2.9–7.7 nm along the entrance slit length of 16 mm. In addition, it is considered an option of the spectrograph design with coupling of spectral and imaging channels based on a 6-component projection lens.

**Keywords:** Hologram diffraction gratings, Convex diffraction gratings, Imaging spectrograph, Spectral resolution.

5. Объемная голография  
и фоточувствительные материалы  
для голографии



### 5.1. Обратимые и необратимые изменения оптических параметров образцов полимерного материала «Диффен», обусловленные воздействием излучения

*О. В. Андреева, Б. Г. Манухин, Н. В. Андреева*

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

В работе проведено комплексное экспериментальное исследование изменений оптической толщины образцов полимерной регистрирующей среды на основе полиметилметакрилата с фенантрехиноном (ФХ/ПММА), обусловленных воздействием излучения. Количественно оценены величины обратимых изменений, обусловленных нагревом образца, и необратимых, обусловленных фотохимическим преобразованием фенантрехинона в фотопродукт.

**Ключевые слова:** Оптика, Голография, Полимерные регистрирующие среды.

Объемные голограммы, благодаря своим уникальным возможностям в последние десятилетия находят все более широкое применение в качестве узкополосных селекторов излучения в оптическом приборостроении, оптических линиях связи [1]; различного рода сенсоров, в том числе биомедицинских [2]; в системах архивной памяти для записи и хранения информации [3].

Перспективы практических приложений объемных высокоселективных голограмм связаны, в первую очередь, с прогрессом в области разработки, создания и исследования объемных регистрирующих сред, обладающих стабильными и воспроизводимыми характеристиками, обеспечивающими эффективную запись, неdestructивное считывание и долговременное хранение информации.

Оптическая толщина,  $n$  ( $n$  — средний показатель преломления среды,  $l$  — толщина образца), является фундаментальным параметром при анализе свойств объемных голограмм и характеристики их изменений в процессе записи информации.

В работе исследованы фотоиндуцированные изменения оптической толщины полимерных образцов объемной среды на основе полиметилметакрилата допированного фенантрехиноном (ФХ/ПММА), обусловленные воздействием излучения: рассмотрены вклады обратимых изменений, обусловленных нагревом, и необратимых изменений, обусловленных преобразованием фенантрехинона (ФХ) в фотопродукт (ФП); обсуждается влияние этих изменений на характеристики регистрируемых голограмм-решеток.

Объект исследования — полимерный регистрирующий материал с диффузионным проявлением для записи объемных голограмм — ФХ/ПММА, один из наиболее перспективных материалов для создания высокоселективных оптических элементов, систем архивной памяти и использования в научных исследованиях [1–3]. Образцы изготовлены по технологии [4], позволяющей получать образцы с концентрацией ФХ  $\approx 0,6\%$  со стабильными и воспроизводимыми параметрами среды, необходимыми для записи голограмм. Образцы изготавливаются в форме дисков диаметром 20–80 мм и толщиной 1–5 мм, обеспечивают запись интерференционной структуры с пространственной частотой от  $100\text{ мм}^{-1}$  и выше, а сохранность записанной информации более 10 лет.

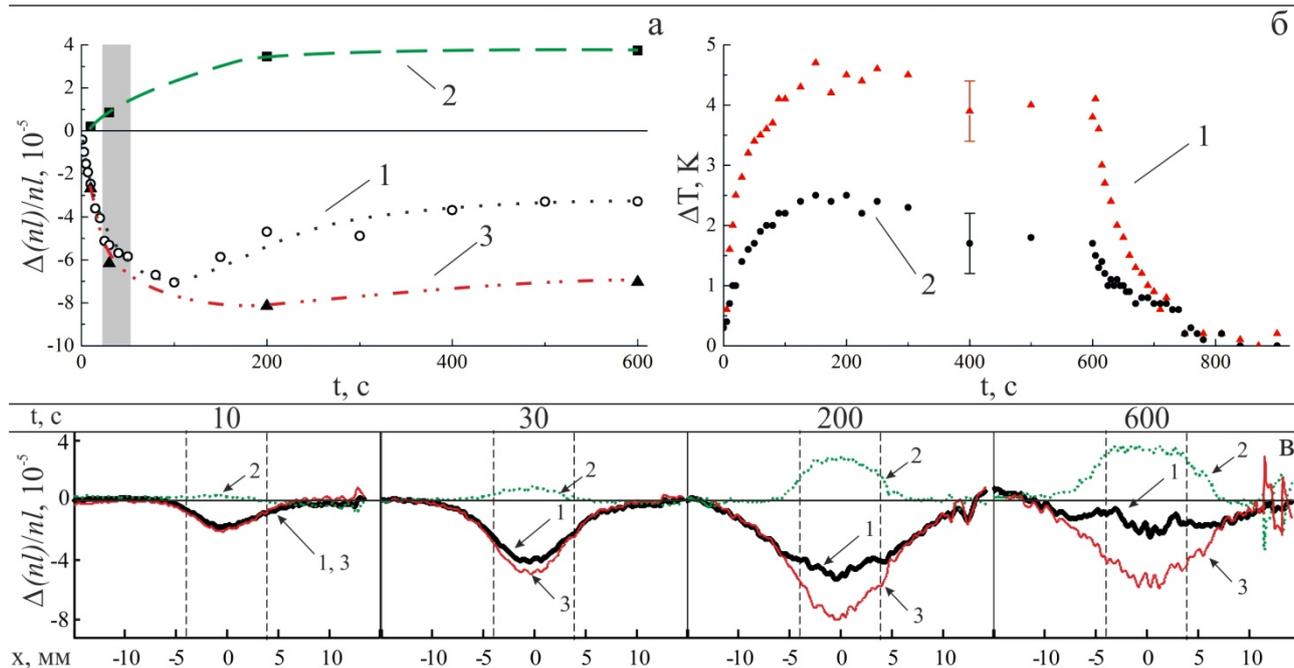
Для экспериментального изучения изменений параметров образцов в процессе воздействия излучения и в постэкспозиционный период (период релаксации после снятия воздействия) был использован экспериментальный стенд, предназначенный для исследования фазовых трансформаций прозрачных объектов методом цифровой голографической интерферометрии (ЦГИ) [5].

На рисунке приведены экспериментальные результаты, полученные на образце ФХ/ПММА толщиной 2,6 мм при воздействии излучения с длиной волны  $\lambda = 473\text{ нм}$  и плотностью мощности  $\approx 2,5 \cdot 10^{-4}\text{ Вт/м}^2$ . Выполнены 4 серии измерений с экспозицией 10 с (серия 1), 30 с (серия 2), 200 с (серия 3), 600 с (серия 4).

Толщина образца 2,6 мм. На рисунке 1а и 1в: 1 — суммарные изменения, происходящие в процессе экспонирования; 2 — необратимые изменения, зафиксированные при  $\Delta T = 0$  через 300 с после окончания экспозиции; 3 — обратимые изменения, обусловленные нагревом.

Величины необратимых относительных изменений оптической толщины образцов ФХ/ПММА, которые обусловлены преобразованием ФХ в ФП, приведены в таблице В предположении, что необратимые изменения физической толщины  $l$  в данном случае не превышают значений  $\Delta l/l \leq 10^{-6}$ , можно считать, что необратимые относительные изменения оптической толщины полностью характеризуют необратимые относительные изменения среднего показателя преломления образца ФХ/ПММА, происходящие в процессе воздействия актиничного излучения.

В результате установлено, что необратимые изменения, обусловленные фотоиндуцированным преобразованием ФХ в ФП, приводят к увеличению оптической толщины образцов ФХ/ПММА в длинноволновой области видимого спектра вне линии поглощения ФХ ( $\lambda > 530\text{ нм}$ ). При преобразовании ФХ в ФП под воздействием излучения  $473\text{ нм}$  с экспозицией  $20\text{ Дж/см}^2$  это изменение, определенное при  $\lambda = 532\text{ нм}$ , составляет величину  $\Delta(nl)/nl = +3,7 \cdot 10^{-5}$ , что позволяет оценить на данной длине волны  $\Delta n/n = +3,7 \cdot 10^{-5}$  в предположении, что  $\Delta l/l < 10^{-6}$ .



а — зависимость относительных изменений оптической толщины образца от времени экспонирования в центре области воздействия излучения  $\lambda = 473$  нм; б — изменение температуры образца,  $\Delta T$ , во время воздействия немодулированного излучения, 473 нм, (кривая 1) и интерференционного поля с пространственной частотой  $350 \text{ мм}^{-1}$ ,  $\lambda = 488$  нм, (кривая 2); в — относительные изменения оптической толщины по оси  $x$  в сечении А-А на участках образца с разным временем экспонирования:  $t = 10$  с, 30 с, 200 с, 600 с

Рисунок 1

Таблица 1. Экспозиционная зависимость относительных изменений оптической толщины и среднего показателя преломления среды ФХ/ПММА, обусловленных преобразованием ФХ в ФП. Тестирующее излучение:  $\lambda = 532$  нм, воздействующее излучение:  $\lambda = 473$  нм

№ п/п	Экспозиция $H$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\Delta(nl)_{\text{ФХ/ФП}}/nl$ ; $\Delta(n)_{\text{ФХ/ФП}}/n$ (при $\Delta l/l \leq 10^{-6}$ )
1	0,33	$+(0,24 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$
2	1,0	$+(0,78 \pm 0,14) \cdot 10^{-5}$
3	6,6	$+(3,10 \pm 0,15) \cdot 10^{-5}$
4	19,8	$+(3,64 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$

Показано, что обратимые изменения, обусловленные нагревом, приводят к уменьшению оптической толщины образца: температурный коэффициент изменения оптической толщины образца материала ФХ/ПММА составляет величину

$$\chi = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T} + \frac{1}{n} \frac{\Delta n}{\Delta T} = -1,45 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

#### Список источников

- [1] Zheng, T. Polarized, phase-encoded and 2D angular multiplexed volume holographic correlator / T. Zheng et al. // J. of Opt. — 2014. — Vol. 16. — № 5. — P. 055405.
- [2] Liu, H. Temperature-induced spectrum response of volume grating as an effective strategy for holographic sensing in acrylamide polymer part I: sensin / H. Liu et al. // Appl. Opt. — 2016. — Vol. 55. — № 35. — P. 9907–9916.
- [3] Hemmer, P. Holography for the New Millenium / P. Hemmer, S. Shahriar, J. Ludman, H. J. Caulfield. — Springer, 2002.
- [4] Andreeva, O. V. / O. V. Andreeva, O. V. Bandyuk, A. A. Paramonov, A. S. Cherkasov, E. R. Gavriluk, P. V. Andreev // J. Opt. Tech. — 2000. — Vol. 67. — № 12. — P. 1043.
- [5] Manukhin B. G. / B. G. Manukhin, M. E. Gusev, D. A. Kucher, S. A. Chivilikhin, O. V. Andreeva // Opt. Spectros. — 2015. — Vol. 119. — № 3. — P. 392–397.

## **Reversible and irreversible alterations of optical parameters of samples of polymeric material Difphen induced by the process of irradiation**

*O. V. Andreeva, B. G. Manukhin, N. V. Andreeva*

Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

In the work complex experimental research of alterations of the optical thickness of samples of polymeric recording medium based on polymethylmethacrylate with phenanthrenequinone (PQ/PMMA) induced by the process of irradiation is presented. Quantitative evaluations of the value of reversible alterations induced by heating the sample and irreversible induced by photochemical conversion of phenanthrenequinone into the photoproduct are given.

**Keywords:** Optics, Holography, Polymeric recording medium.

## 5.2. Изобразительные голограммы на бихромате желатины

*С. А. Шойдин*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Приведены примеры серийной записи голограмм Денисюка на БХЖ. Показаны применяемые алгоритмы обработки. Предложены алгоритмы обработки, стабилизирующие процессы проявления для серийного изготовления голограмм на БХЖ. Сформулированы рекомендации, основанные на десятилетнем опыте применения указанных алгоритмов в практической работе.

**Ключевые слова:** Оптика, Голография, Изобразительные голограммы, Бихромированная желатина.

С момента взрывного развития голографии [1, 2] прошло много лет, но до сих пор одним из наиболее эффективных голографических материалов является Бихромированный желатин (БХЖ) [3]. Изучению механизмов появления фотоотклика в этом материале посвящено множество исследований, основные результаты которых уже давно отражены в целом ряде обзоров, из которых можно выделить работы [4–6]. Несмотря на это, интерес исследователей и в настоящее время привязан к этому материалу [7–9]. Это вызвано не прекращающимися попытками создавать на его основе новые оптические элементы и даже использовать в художественной голографии [10–13].

Особыми преимуществами БХЖ, кроме доступности, является большой диапазон фотоиндуцированного изменения фазы записываемых голографических решёток и высокое разрешение, что позволяет записывать на этом материале голограммы с высокой дифракционной эффективностью.

Продолжающееся много лет изучение механизмов формирования фотоотклика БХЖ, очевидно, связано с многообразием физико-химических процессов, участвующих в его формировании. Так, в [6] отмечается, что в БХЖ под действием света происходят сложные процессы формирования скрытого изображения, поразительные в своём многообразии. А именно: после экспонирования слоя БХЖ, кроме записи оптической информации за счет переходов  $\text{Cr}^{6+}$  –  $\text{Cr}^{5+}$  (что наблюдается в водных растворах хроматов) и переходов «спираль-клубок» участков макромолекул, происходит и усиление фотографического эффекта по двум взаимосвязанным каналам. По первому каналу идёт диффузия ионов  $\text{Cr}^{6+}$  в засвеченные области, где концентрация ионов  $\text{Cr}^{6+}$  снижается за счет их перехода в ионы  $\text{Cr}^{5+}$ . Во втором канале происходит «развивание» и структур под действием засветки, что создает больше места для локализации ионов  $\text{Cr}^{6+}$ . Поступление свободной воды из неэкспонированных областей приводит к модификации ионов хрома в октаэдрическое состояние  $\text{Cr}^{3+}$ , обеспечивающее уже дубление желатина за счет образования мостичных связей. Эти процессы, как пишет автор, можно рассматривать как предпроявление скрытого изображения.

Само изображение в БХЖ формируется, как сообщается в [6], как минимум, десятью механизмами, (таблица 1). Однако даже очень сложные, многоступенчатые химические процессы, начиная от фотовоз-

буждения метиленового голубого, через его связывание с молекулой желатина и перенос возбуждения в реакции релаксации шестивалентного хрома вместе со сложным процессом взаимодействия с водой и сушащими спиртами, при которых изменяется не только поверхностный рельеф, но и возникает система микротрещин внутри БХЖ, на которой эффективно дифрагирует свет при восстановлении, не дают ясного представления о ходе химических реакций на практике, поскольку все реакции, перечисленные выше, имеют сложную, конкурирующую между собой форму.

В процессе работы с материалом БХЖ было выяснено, что на качество и количественные характеристики зарегистрированного и восстановленного голограммой изображения сильно влияет множественность имеющихся каналов протекания химических реакций. На степень конкурентности той или иной реакции влияет множество параметров, главные из которых: влажность БХЖ перед фоторегистрацией и влажность окружающей среды, его температура и температура обрабатываемых растворов, концентрация сенсibilизатора, бихромата аммония, физических свойств материала подложки качества желатина, его происхождения и истории хранения и, возможно, даже окружающего магнитного поля.

Более того, сохранность полученных голограмм также составляет большую проблему голограмм на БХЖ, поскольку вся структура химически и структурно деформированных молекул сильно подвержена влиянию воды. Гидратные оболочки, окружающие полярные группы макромолекул желатина, создают упругую водную сетку. Таким образом, жидкость, заполняющая сетку студня и называемая интермицеллярной, можно условно разделить на две части: «свободную» и «связанную», входящую в состав сольватных оболочек. Связанная вода, в отличие от свободной, отличается особыми свойствами — большей плотностью, пониженной температурой замерзания, потерей растворяющей способности [6].

Требования защиты голограмм от влаги известны. Это, прежде всего, защита от попадания влаги на изготовленную голограмму. Как уже говорилось, многие процессы в БХЖ обратимы, что разрушает голограмму, однако мало кто задумывался над фактом наличия источника влаги в самой желатине. Сольватные оболочки, содержащие воду, тоже недостаточно стабильны и могут при изменении условий хранения эту воду восстанавливать, переводить её в свободную,

Таблица 1. Механизмы формирования фазового рельефа в слоях БХЖ

№ п/п	Гипотетический механизм	Условия максимального выявления	Разрешающая способность, л/мм
1	Вымывание (растворение) незадублированного желатина	Перемешивание горячей воды	30
2	Дифференциальное набухание желатина	Тёплая вода, изменение pH, проявление парами воды	300
3	Переход «клубок-спираль»	Облучение светом, тёплая вода, самопроявляющиеся слои ДЖ	10 000
4	Деформация молекул коллагена	Тёплая вода, самопроявляющиеся слои	10 000
5	Связывание молекул пропанола в местах сшивки	Дегидратация изопропанолом	10 000
6	Изменение размеров микропор слоя ДЖ	Проявление парами воды	1 000
7	Образование микротрещин и микровакуолей	Быстрая дегидратация или сушка в вакууме	10 000
8	Возникновение вариаций показателя преломления за счёт напряженно-деформированного состояния слоя	Быстрая дегидратация или сушка в вакууме	10 000
9	Перестройка структуры связанной воды	Самопроявляющиеся желатин-глицериновые слои	10 000
10	«Выходы» голографической структуры на поверхность слоя	Запись голограмм по схеме Ю. Н. Денисюка	15 000

которая вновь вступает в различные реакции, разрушающие ранее записанную голограмму.

В целом мы приходим к выводу, что наличие большого набора конкурирующих реакций, часть из которых ещё и обратима, не позволяет нам опираться в практической работе на какой-нибудь стабильный алгоритм обработки голограмм на БХЖ, тем более, что мы, во-первых, как правило, плохо знаем природу возникновения фоточувствительности такой сложной органической структуры, как Бихромированный желатин, а, во-вторых, сильно зависим от окружающих параметров (влажность, температура, условия хранения и др.). Подчеркнём, что указанные факторы влияют на характеристики записанной голограммы не только в момент записи, но, что ещё хуже, влияет «история» их воздействия на БХЖ. Всё это приводит к плохой повторяемости результатов и значительно ограничивает серийное изготовление и применение таких голограмм.

Учитывая всё вышесказанное, на основании многих попыток организовать стабильный процесс изготовления голограмм на БХЖ, нами было предложено два шага по доработке серийной технологии обработки БХЖ к серийному производству голограмм на этом материале.

Первым шагом мы ввели промежуточный контроль и обратную связь на производстве. Технологический процесс стал выглядеть следующим образом (рисунок 1). Здесь под термином «химический удар» (рисунок 1, п. 5) был обозначен процесс купания пластинки БХЖ в спиртах. Скорость собственной усадки желатина может отставать от скорости удаления влаги спиртами, из-за чего может образовываться сетка микротрещин. Эта сетка не всегда приводит к браку, иногда она, при микроскопических размерах этих микро-

трещин, даже полезна — повышает фотоиндуцированное изменение среднего показателя преломления в среде, увеличивая дифракционную эффективность.

В результате целого ряда экспериментов мы пришли к выводу, что оптимальным в наших условиях является в пятиступенчатое купание в спиртах (рисунок 1, п. 5). Но и этот процесс крайне нестабилен. Рост микротрещин может иметь взрывной характер, что наблюдается как появление «молока» на поверхности голограммы. Однако из-за существенного изменения параметров окружающей среды даже процесс с обратной регулирующей связью не всегда мог быть реализован. Например, в наших реальных условиях, то есть в резко континентальном климате, в котором находится Западная Сибирь, где резкие изменения температуры сопровождаются резкими изменениями влажности. А поскольку процесс обработки нами проводился не по отдельности для каждой пластинки, а мелкосерийными партиями — по многу пластинок в одной каретке, то и потери из-за брака становились ощутимыми.

Для компенсации меняющихся (под действием внешних параметров) оптимальных условий проявки мы сделали второй шаг — ввели предварительное дублирование БХЖ в сушильном шкафу при  $t = 200^\circ\text{C}$ . Оно осуществлялось между первым и вторым этапами обработки (рисунок 1). Это приводило к стабилизации процесса проявления, но и снижало голографическую чувствительность материала.

Дальнейшие поиски решения этой проблемы привели к замене физического (температурного) дублирования — химическим. Действительно, при замене этапа 5 с обычной обработкой в спиртах на обработку в спиртах с одновременным химическим дублированием были получены желаемые результаты. Условия обработки даже для резких изменений окружающих условий, например, от зимы к лету, практически стабилизировались.

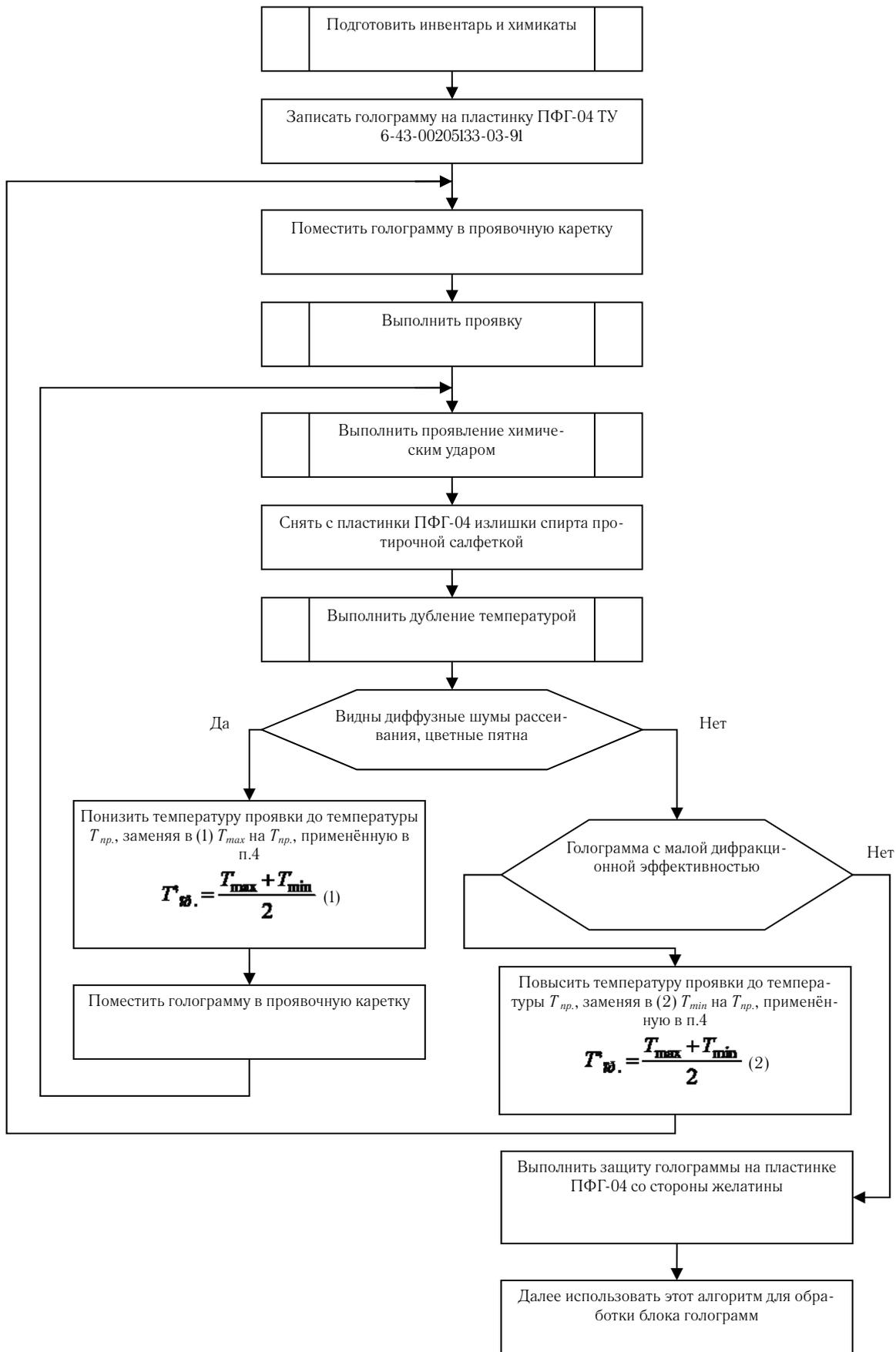


Рис. 1. Блок-схема технологического процесса изготовления голограмм на БХЖ с регулирующей параметрами обработки обратной связью

Серийное производство голограмм на толстых (до 20 мкм) слоях БХЖ было налажено. Следует отметить, что в этом играл значительную роль и тот фактор, что требуемая температура проявления в воде (рисунок 1, п. 5) при химическом дублировании существенно повышалась, что позволило унифицировать существовавшие до этого по-отдельности летний и зимний варианты обработки БХЖ.

Также было замечено, что голограммы с химическим дублированием были более устойчивы при длительном хранении. Так, у нас на 2017 год сохранились в отличном качестве БХЖ голограммы, выпущенные в 2005 г. к 60-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг., которые хранились в резко континентальном климате, в обычных условиях помещения, без мер предохранения, а некоторые ещё и объехали в командировках полмира, побывав и в тропиках, и в южном полушарии.

Более подробно этап 5 на рисунке 1 выглядел так. После проявки в водной ванне, на этапе 4, выполнялся 5-й этап, состоявший из последовательности 5 операций:

5.1. Обработка в 25 % водном растворе изопропанола — 2 мин.,  $t = 15-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

5.2. Обработка в 50 % водном растворе изопропанола с добавлением 3 % формальдегида — 3,5 мин.,  $t = 15-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

5.3. Обработка в 75 % водном растворе изопропанола — 2 мин.,  $t = 15-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

5.4. Обработка в 90 % водном растворе изопропанола — 2 мин.,  $t = 15-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

5.5. Обработка в 100 % водном растворе изопропанола — 2 мин.,  $t = 15-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Здесь, в п. 5.2, в пересчёте на 40 %-й водный раствор формальдегида добавлялось 120 мл на литр изопропанола в водном растворе.

Следует отметить ещё один фактор, устраняемый указанной выше процедурой химического дублирования формалином на этапе обработки в спиртах. Это было повышение температуры проявления в водном растворе на этапе 5. Дело в том, что часто свежизготовленные пластинки БХЖ имеют оптимальную температуру проявления на этапе 5 меньше, чем температура окружающей среды. В условиях активной работы в летнее время для обеспечения этого нужны охлаждаемые ванны. Кроме того, для стабилизации процесса регулярного нагрева растворов меняющимися пластинками требуются ванны большого объёма. В описанной выше технологии необходимость в такой искусственной термостабилизации отпадает, поскольку оптимальная температура обработки приближается к комнатной.

Таким образом, экспериментальным путём был отработан технологический процесс серийного производства голограмм на БХЖ, который отличается от типового наличием обратной связи и одновременным проведением двух встречных химических процессов (проявления и дублирования) в одном технологическом этапе. Благодаря этому удалось реализовать неустойчивый по своей природе процесс обработки БХЖ в условиях нестабильности внешних факторов с высокой степенью повторяемости и с высокими показателями дифракционной эффективности при низких шумах и хорошей сохраняемости готовых голограмм, которые долгое время выпускались, как элементы бытовых осветительных приборов, а в дальнейшем их область применения была расширена [12, 13].

#### Список источников

- [1] Денисюк, Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Доклады Академии наук СССР. — 1962. — Том 144. — № 6. — С. 1275–1278.
- [2] Leith, E. N. Reconstructed Wavefronts and Communication Theory / E. N. Leith, J. Upatnieks // Journal of the Optical Society of America. — 1962. — Vol. 52. — № 10. — P. 1123–1130. — DOI: 10.1364/JOSA.52.001123.
- [3] Chang, M. Dichromate Gelatin of Improved Optical Quality // J. Opt. Soc. Am. — 1971. — Vol. 10. — № 11. — P. 2550–2551. — DOI: 10.1364/AO.10.002550
- [4] Апрель, Ж. Оптическая голография / Ж. Апрель, А. Арсено, Н. Баласубрамания Н. и др.; пер. с англ. под ред. Г. Колфилда. — М.: Мир, 1982. — Том 1. — 376 с.
- [5] Кольер, Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. — М.: Мир, 1973. — 686 с.
- [6] Малов, А. Н. Голографические регистрирующие среды на основе дихромированного желатина: супрамолекулярный дизайн и динамика записи. / А. Н. Малов, А. В. Неупокоева. — Иркутск: Иркутское высшее военное авиационное училище, 2006. — 347 с.
- [7] Артемьев, С. В. Слои бихромированной желатины, сенсibilизированные для зелено-красной области спектра. / С. В. Артемьев, Е. Д. Войкова, Г. И. Коваль, М. К. Шевцов. // В сб.: Фотохимические процессы регистрации голограмм под ред. В. А. Варачевского. — Л., 1983. — С. 131–137.
- [8] Выговский, Ю. Н. Управление свойствами самопроявляющихся “красных” желатин-глицериновых систем / Ю. Н. Выговский, П. А. Драбатулин, А. Г. Коноп, С. П. Коноп, А. Н. Малов // В сб.: Применение лазеров в науке и технике. — Вып. IX. — ИФ ИЛФ СО РАН: Иркутск, 1997. — С. 149–159.
- [9] Ганжерли, Н. М. Толстослойный бихромированный желатин для голографии, чувствительный в красной области спектра / Н. М. Ганжерли, Ю. Н. Денисюк, С. П. Коноп, И. А. Маурер // Письма в ЖТФ. — 2000. — Том 26. — № 16.
- [10] Лукин, А. В. Голограммы Ю. Н. Денисюка на “толстых” слоях БХЖ как оптические элементы: селективные зеркала, NOTCH-фильтры, дифракционные решетки / А. В. Лукин, Н. М. Шигапова // Сб. трудов Всероссийского семинара “Юрий Николаевич Денисюк — основоположник отечественной голографии”. — Санкт-Петербург, 22–24 мая 2007. — С. 144–147.

- [11] **Горноста́й, А. В.** Метод расчёта дифракционного делителя пучков лазерного излучения со спектральной селекцией на основе бихромированной желатины / А. В. Горноста́й, С. Б. Одиноков // Компьютерная оптика. — Том 40. — № 1. — 2016. — С. 45–50.
- [12] **Шойдин, С. А.** Применение голограмм Денисюка в рекламе // Сб. трудов Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета. — СПб, 2012. — С. 93–97.
- [13] **Shoydin, S. A.** Application of Denisuk's Hologras in Advertising // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2013. — Vol. 22. — № 4. — P. 272–274.

## **Hologram images on the gelatin's dichromat**

*S. A. Shoydin*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

The examples of Denisuk holograms recorded on Dichromated gelatin. The applied processing algorithms are shown. Processing algorithms are proposed that stabilize the manifestation processes for serial production of holograms on Dichromated gelatin. Recommendations based on ten years of experience in applying these algorithms in practical work are formulated.

**Keywords:** Optics, Holography, Holographic image, Dichromated gelatin.

### 5.3. Дифракционные и интерферометрические методы исследования периодически поляризованных доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития

С. М. Шандаров<sup>1</sup>, А. Е. Мандель<sup>1</sup>, Е. Н. Савченков<sup>1</sup>, М. В. Бородин<sup>1</sup>, С. В. Смирнов<sup>1</sup>, А. Р. Атматханов<sup>2</sup>, В. Я. Шур<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Рассмотрены методы исследования параметров, созданных в кристаллах ниобата лития переполаризацией во внешнем пространственно-периодическом электрическом поле структур со 180-градусными доменными стенками, параллельными кристаллографическим осям  $Z$  и  $Y$ , основанные на линейной дифракции световых волн. Экспериментально исследована изотропная и анизотропная дифракция Брэгга на периодически поляризованных структурах в кристалле  $\text{LiNbO}_3: 5\% \text{MgO}$ .

**Ключевые слова:** Периодически поляризованные доменные структуры, Дифракция Брэгга, Анизотропная дифракция, Ниобат лития.

#### Введение

Периодические, квазипериодические и чирпированные поляризованные структуры, создаваемые в сегнетоэлектрических кристаллах методами доменной инженерии [1, 2], существенно расширяют функциональные возможности устройств, предназначенных для нелинейных преобразований и управления параметрами лазерного излучения, предоставляя также возможность использования всего диапазона прозрачности базового материала [3–7]. Размеры доменов в таких структурах должны быть выдержаны с высокой точностью. Оценка на основе приведенных в работе [8] соотношений показывает, что в периодически поляризованных доменных структурах (ППДС), созданных в ниобате лития для генерации второй оптической гармоники в зеленой области спектра, ошибка в значении периода не должна превышать 10 нм. Реальные периодические доменные структуры в сегнетоэлектрических кристаллах отличаются от идеальных наличием вариаций размеров доменов, случайных и периодических ошибок в положениях доменных границ и другими технологическими особенностями формирования, ухудшающими их характеристики [1].

Эффективным методом определения качества ППДС является дифракция световых пучков в линейном режиме [9–12]. Использование метода брэгговской дифракции света с длиной волны  $\lambda = 633$  нм на ППДС с  $\Lambda = 6,1$  мкм, полученной в процессе выращивания монокристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Y:Mg}$  в направлении нормали к грани  $(01\bar{1}2)$ , позволило авторам [9] зафиксировать, в отсутствие внешнего поля, 15 порядков дифракции Брэгга при поляризации света, соответствующей необыкновенной волне. Для наблюдения соответствующих дифракционных максимумов образцы  $X$ -среза исследуемых кристаллов с толщиной 7 мм вращались вокруг оси, перпендикулярной как направлению  $X$ , так и нормали к слоям периодической структуры. Проведенный в работе [9] на основании данных по дифракционной эффективности в брэгговских порядках синтез профиля показателя преломления показал, что его возмущения на пространственном периоде структуры имеют вид двух пиков одинакового знака с

шириной 0,2 и 0,5 мкм, которые локализованы в узкой области вблизи положительно и отрицательно заряженных доменных стенок соответственно.

Для ППДС, сформированных в пластинах  $Z$ -среза ниобата лития с толщиной от 0,5 до 1,0 мм методом переполаризации во внешнем пространственно-периодическом электрическом поле, распространение световых пучков вдоль оси  $Z$  позволяет наблюдать в линейном режиме картину со многими дифракционными максимумами [10–12]. В работе [10] такая дифракция исследовалась для лазерного излучения с длинами волн 333 и 455 нм на ППДС с пространственными периодами 29,5 и 25 мкм в пластинах  $Z$ -среза конгруэнтного ниобата лития, имеющих толщину  $d = 0,5$  мм. С помощью жидкостных электродов в исследуемой пластине создавалось однородное электрическое поле с вектором напряженности, направленным вдоль оси  $Z$ . Его величина изменялась от 0 до 12 кВ/см и не превосходила соответствующее коэрцитивное поле. Наблюдаемая картина с многими максимумами связывается авторами [10] с несинусоидальным характером создаваемых ППДС возмущений показателя преломления кристалла, а одинаковое угловое расстояние между этими максимумами, соответствующее пространственному периоду исследуемых структур даже в отсутствие внешнего поля — с внутренним электрическим полем, присутствующим в сегнетоэлектрике после переполаризации. Проведенное ими моделирование дифракции света на ППДС, содержащей флуктуации пространственного периода, позволило связать с ними экспериментально наблюдаемое фоновое излучение между дифракционными максимумами и сделать вывод о возможности оценки качества изготовленных структур по измерениям интенсивности такого рассеянного света. На основе анализа изменений дифракционных картин в дальней зоне при изменении внешнего электрического поля и сопоставления результатов экспериментов с расчетами авторов [10] удалось оценить как период, так и скважность исследованных доменных структур.

В работах [11, 12] дифракция с многими максимумами исследовалась для ППДС со 180-градусными доменными стенками, параллельными кристаллографическим осям  $Z$  и  $Y$ , сформированными в образцах  $\text{MgO:LiNbO}_3$  с толщиной 1 мм. Эксперименты проводились для лазерного излучения с  $\lambda = 655$  нм, без приложения внешних полей. При этом дифракционная картина имела изотропный характер и позволяла одновременно наблюдать максимумы от 9-го до +9-го порядков при периоде структуры  $\Lambda = 6,89$  мкм [11] и более 20-ти максимумов для ППДС с  $\Lambda = 9,43$  мкм [12]. Для теоретического описания распределения интенсивности в наблюдаемых при этом дифракционных максимумах в работе [12] была использована развитая авторами [11] модель возмущений тензора диэлектрической непроницаемости кристалла доменными стенками ППДС и известный подход к описанию волнового поля в периодических структурах, как рассмотрение граничной задачи [13].

В настоящем сообщении рассмотрены методы исследования созданных в кристаллах ниобата лития переполаризацией во внешнем пространственно-периодическом электрическом поле ППДС со 180-градусными доменными стенками, параллельными кристаллографическим осям  $Z$  и  $Y$ , основанные на линейной дифракции световых волн. Для случая распространения зондирующего пучка вдоль оси  $Z$  образцов с ППДС, когда может быть использован подход к описанию волнового поля в периодических структурах, как рассмотрение граничной задачи, обсуждается возможность использования интерферометрических методов при исследовании возмущений оптических свойств кристалла, имеющих место в реальных образцах.

### 1. Возмущения диэлектрической проницаемости, сопровождающие ППДС в кристаллах ниобата лития

Следуя подходу, развитому в [11, 12], проведем анализ возмущений диэлектрической проницаемости для ППДС в кристалле ниобата лития, создаваемых чередующимися 180-градусными доменными стенками, параллельными осям  $Z$  и  $Y$ . Будем считать, что две периодические системы стенок с поляризацией, изменяющейся вдоль координаты  $x$  с  $-\mathbf{P}_S$  на  $\mathbf{P}_S$  и с  $\mathbf{P}_S$  на  $-\mathbf{P}_S$ , могут иметь пространственный сдвиг, отличающийся от половины периода ППДС  $\Lambda/2$  на некоторую величину  $\pm\Delta x$ . Идеализированная стенка, вблизи которой реализуется изменение вектора спонтанной поляризации с  $-\mathbf{P}_S$  на  $\mathbf{P}_S$ , характеризуется следующей зависимостью его модуля  $P_z$  от пространственной координаты [14]:

$$P_z(x) = P_S \operatorname{th} \left( \frac{x}{\omega_0} \right), \quad (1)$$

где  $\omega_0$  — половинная толщина доменной стенки и  $P_S = |\mathbf{P}_S|$ .

Создаваемые вследствие электрострикции и обратного флексоэлектрического эффекта полями доменных стенок изменения электрической поляризации индуцируют зависящие от координаты  $x$  упругие поля, которые обуславливают дополнительные к вкладу спонтанного квадратичного электрооптического эффекта упругооптические возмущения компонент тензора диэлектрической проницаемости кристалла на частоте световой волны. Для ППДС, содержащей  $2N + 1$  таких стенок, эти возмущения могут быть представлены в виде суммы [12]:

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{(1)}(x) = \Delta \varepsilon_{ij}^{m(1)} \sum_{n=-N}^N \operatorname{ch}^{-2} \left( \frac{x + n\Lambda}{\omega_0} \right) \quad (2)$$

со следующими максимально достигаемыми значениями:

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{11}^{m(1)} &= n_o^4 P_S^2 \left( R_{13} + p_{11} \frac{d_{31}^S}{C_{11}^P} \right), \\ \Delta \varepsilon_{22}^{m(1)} &= n_o^4 P_S^2 \left( R_{13} + p_{12} \frac{d_{31}^S}{C_{11}^P} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{33}^{m(1)} &= n_e^4 P_S^2 \left( R_{33} + p_{31} \frac{d_{31}^S}{C_{11}^P} \right), \\ \Delta \varepsilon_{23}^{m(1)} &= \Delta \varepsilon_{32}^{m(1)} = n_o^2 n_e^2 P_S^2 p_{41} \frac{d_{31}^S}{C_{11}^P}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{13}^{m(1)} &= \Delta \varepsilon_{31}^{m(1)} = n_o^2 n_e^2 \frac{P_S}{2\omega_0} \times \\ &\times \frac{p_{14} (f_{1132} C_{14}^P - f_{3131} C_{66}^P) + p_{41} (f_{3131} C_{14}^P - f_{1132} C_{44}^P)}{C_{44}^P C_{66}^P - (C_{14}^P)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{12}^{m(1)} &= \Delta \varepsilon_{21}^{m(1)} = n_o^4 \frac{P_S}{2\omega_0} \times \\ &\times \frac{p_{14} (f_{1132} C_{14}^P - f_{3131} C_{66}^P) + p_{66} (f_{3131} C_{14}^P - f_{1132} C_{44}^P)}{C_{44}^P C_{66}^P - (C_{14}^P)^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

где  $n_o$  и  $n_e$  — обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кристалла;  $R_{i3}$  — электрооптические постоянные квадратичного эффекта и  $p_{ik}$  — упругооптические постоянные;  $C_{ik}^P$  — модули упругости при постоянной электрической поляризации,  $d_{ik}^S$  — тензор тензор электрострикции механически зажато кристалла и  $f_{ijkl}$  — компоненты тензора флексоэлектрической связи.

Стенки второго типа, с изменением спонтанной поляризации с  $\mathbf{P}_S$  на  $-\mathbf{P}_S$ , полагаем смещенными относительно стенок первого типа на расстояние  $\Lambda/2 + \Delta x$  [12]:

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{(2)}(x) = \Delta \varepsilon_{ij}^{m(2)} \sum_{n=-N}^N \operatorname{ch}^{-2} \left( \frac{x + n\Lambda + \Lambda/2 + \Delta x}{\omega_0} \right), \quad (7)$$

при этом максимально достигаемые для них значения возмущений диэлектрической проницаемости удовлетворяют соотношениям

$$\Delta \varepsilon_{11}^{m(2)} = \Delta \varepsilon_{11}^{m(1)}, \quad \Delta \varepsilon_{22}^{m(2)} = \Delta \varepsilon_{22}^{m(1)}, \quad \Delta \varepsilon_{33}^{m(2)} = \Delta \varepsilon_{33}^{m(1)},$$

$$\Delta \varepsilon_{23}^{m(2)} = \Delta \varepsilon_{32}^{m(2)} = \Delta \varepsilon_{23}^{m(1)}. \quad (8)$$

$$\Delta \varepsilon_{13}^{m(2)} = \Delta \varepsilon_{31}^{m(2)} = \Delta \varepsilon_{13}^{m(1)},$$

$$\Delta \varepsilon_{12}^{m(2)} = \Delta \varepsilon_{21}^{m(2)} = \Delta \varepsilon_{12}^{m(1)}. \quad (9)$$

Для ППДС с большим количеством доменных стенок, при  $N \gg 1$ , компоненты тензора  $\Delta \varepsilon_{ij}^g(x) = \Delta \varepsilon_{ij}^{(1)}(x) + \Delta \varepsilon_{ij}^{m(1)}(x)$  могут быть представлены в виде разложений в ряд Фурье [12]. Для компонент  $\Delta \varepsilon_{11}^g$ ,  $\Delta \varepsilon_{22}^g$ ,  $\Delta \varepsilon_{33}^g$ ,  $\Delta \varepsilon_{23}^g = \Delta \varepsilon_{32}^g$ , связанных со спонтанным квадратичным электрооптическим эффектом и упругооптическим вкладом [формулы (3) и (4)], эти разложения характеризуются следующими координатными зависимостями для нечетных и четных фурье-гармоник с пространственными периодами  $(2p-1)\Lambda$  и  $2p\Lambda$ , соответственно [12]:

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{(2p-1)}(x) = 4\Delta \varepsilon_{ij}^{m(1)} F_{2p-1} \sin \left[ \frac{(2p-1)\pi}{\Lambda} \Delta x \right] \times$$

$$\times \sin \left[ (2p-1) \frac{2\pi}{\Lambda} \left( x + \frac{\Delta x}{2} \right) \right]. \quad (10)$$

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{2p}(x) = 4\Delta \varepsilon_{ij}^{m(1)} F_{2p} \sin \left[ \frac{2p\pi}{\Lambda} \Delta x \right] \times$$

$$\times \sin \left[ 2p \frac{2\pi}{\Lambda} \left( x + \frac{\Delta x}{2} \right) \right]. \quad (11)$$

где  $p = 1, 2, 3, \dots$ , а за  $F_k$  обозначены коэффициенты фурье-разложения функции  $\text{ch}^{-2}(x/\omega_0)$ .

Для недиагональных компонент тензора, которые могут быть отличными от нуля исключительно за счет флексоэлектрического эффекта [формулы (5) и (6)], координатные зависимости соответствующих фурье-гармоник определяются выражениями [12]:

$$\Delta \varepsilon_{13,12}^{(2p-1)}(x) = -4\Delta \varepsilon_{13,12}^{m(1)} F_{2p-1} \cos \left[ \frac{(2p-1)\pi}{\Lambda} \Delta x \right] \times$$

$$\times \cos \left[ (2p-1) \frac{2\pi}{\Lambda} \left( x + \frac{\Delta x}{2} \right) \right]. \quad (12)$$

$$\Delta \varepsilon_{13,12}^{2p}(x) = -4\Delta \varepsilon_{13,12}^{m(1)} F_{2p} \sin \left[ \frac{2p\pi}{\Lambda} \Delta x \right] \times$$

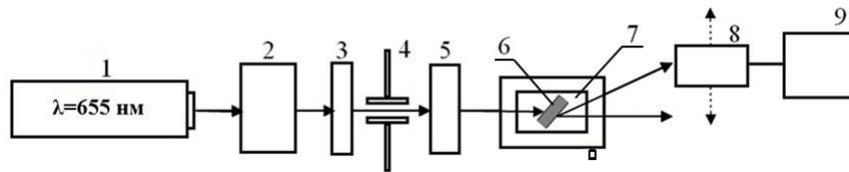
$$\times \sin \left[ 2p \frac{2\pi}{\Lambda} \left( x + \frac{\Delta x}{2} \right) \right]. \quad (13)$$

## 2. Дифракционные процессы, реализуемые в линейном режиме при распространении зондирующего пучка вдоль осей Z и X кристалла

Как следует из соотношений (2) — (13), в линейном режиме для рассматриваемых ППДС возможна реализация различных дифракционных процессов. Для светового пучка, поляризованного вдоль оси Y (или X) и распространяющегося точно вдоль оси Z кристалла интенсивности  $I_{(2p-1)}$  и  $I_{2p}$  дифракционных максимумов нечетных и четных порядков определяются амплитудами фурье-гармоник  $\Delta \varepsilon_{22}^{(2p-1)}(x)$  и  $\Delta \varepsilon_{22}^{2p}(x)$  [или  $\Delta \varepsilon_{11}^{(2p-1)}(x)$  и  $\Delta \varepsilon_{11}^{2p}(x)$ ]. Характерно, что для идеальной

ППДС с  $\Delta x = 0$  интенсивности нечетных дифракционных максимумов должны обращаться в ноль. Проведенные в работах [11, 12, 15] экспериментальные исследования такой изотропной дифракции с многими максимумами, наблюдаемыми, как отмечалось выше, одновременно, показали, что для реальных структур, сформированных в образцах  $\text{LiNbO}_3: 5\% \text{MgO}$ , имеющих периоды 6,89 и 9,43 мкм, интенсивности нечетных дифракционных максимумов отличны от нуля, причем интенсивности максимумов первого и второго порядков удовлетворяют условию  $I_2 > I_1$ . Следует отметить, что за счет фурье-гармоник для возмущений  $\Delta \varepsilon_{12}^{(2p-1)}(x) = \Delta \varepsilon_{21}^{(2p-1)}(x)$  и  $\Delta \varepsilon_{12}^{2p}(x) = \Delta \varepsilon_{21}^{2p}(x)$ , при распространении зондирующего пучка вдоль оси Z на рассматриваемой ППДС возможна и дифракция с поворотом плоскости поляризации.

При распространении световых волн вдоль оси X кристалла на возмущениях оптических свойств, определяемых исключительно локализованными вблизи доменных стенок ППДС упругими деформациями, индуцированными вследствие изменения спонтанной поляризации и благодаря эффекту электрострикции и описываемых компонентами тензора  $\Delta \varepsilon_{23}^g = \Delta \varepsilon_{32}^g$  [формула (4)], возможно наблюдение дифракции в коллинеарной геометрии [11]. Для идеальной структуры с  $\Delta x = 0$  эффективность коллинеарной дифракции будет максимальной во втором порядке дифракции, при  $2p = 2$  [формула (11)], то есть она реализуется на решетке возмущений с пространственным периодом  $\Lambda_g = \Lambda/2$ . Для ППДС с  $\Lambda = 6,89$  мкм коллинеарная дифракция была экспериментально реализована и исследована в работе [11]. Было установлено, что коллинеарная дифракция на фазовой решетке с пространственным периодом  $\Lambda_g = \Lambda/2 = 3,445$  мкм наблюдается в спектральной области с полушириной  $\approx 3$  нм, а ее эффективность максимальна на длине волны 397,5 нм в центральной части кристалла, где расположена рабочая область ППДС, предназначенной для генерации второй оптической гармоники с длиной волны 532 нм. Это позволило авторам [11] сделать вывод о хорошем качестве доменных стенок, параллельных плоскости YZ кристалла, в данной части образца. В данном образце наблюдалась и коллинеарная дифракция на длине волны 623 нм, на решетке с основным пространственным периодом ППДС  $\Lambda_g = \Lambda = 6,89$  мкм в областях, прилегающих к рабочей части. Как следует из формулы (10), такая дифракция в первом порядке, при  $(2p-1) = 1$ , может наблюдаться, если  $\Delta x \neq 0$ . Таким образом, наблюдаемые в [11] особенности коллинеарной дифракции на ППДС связаны с различиями в величине скважности структуры вдоль координаты z, вдоль которой прикладывается электрическое поле в процессе переполяризации. В центре образца, для рабочей области, расстояние между доменными стенками двух типов с большой точностью соответствует  $\Lambda/2$ , то есть условию  $\Delta x = 0$ .



1 — полупроводниковый лазер ( $\lambda = 655$  нм), 2 — коллиматор, 3 — поляризационная призма, 4 — диафрагма, 5 — цилиндрическая линза, 6 — кристалл  $\text{LiNbO}_3: 5\% \text{MgO}$  с ППДС, 7 — юстировочный столик, 8 — фотодиод, 9 — микроамперметр  
Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования изотропной и анизотропной брэгговской дифракции света

### 3. Процессы брэгговской дифракции, реализуемые в линейном режиме при распространении зондирующего пучка в плоскости $UX$ кристалла

Эксперименты с ППДС, сформированной в образце  $\text{LiNbO}_3: 5\% \text{MgO}$  с размерами  $40 \times 2 \times 1$  мм<sup>3</sup> вдоль осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , соответственно, и имеющей период  $\Lambda = 8,79$  мкм, показали, что падение зондирующего лазерного пучка на перпендикулярную оси  $Y$  грань кристалла под определенными углами в плоскости  $UX$  приводит к дифракционным процессам, характеризующимся высокой угловой селективностью. В данном образце доменная структура полностью занимала пространство между гранями образца, перпендикулярными оси  $Y$ , и имела высокую однородность параметров вдоль этого направления, обеспечивая брэгговский характер как при изотропной, так и при анизотропной дифракции.

Схема экспериментальной установки для исследования характеристик изотропной и анизотропной брэгговской дифракции на ППДС в данном образце показана на рисунке 1.

Зондирующий пучок с апертурой 2 мм в плоскости  $UX$  формировался с использованием коллиматора 2 и диафрагмы 4 от полупроводникового лазера 1 с  $\lambda = 655$  нм и выходной мощностью 25 мВт. Цилиндрическая линза 5 фокусировала его в центр образца, создавая перетяжку с размером  $\approx 30$  мкм вдоль оси  $Z$ . Входная поляризация пучка, соответствующая падающей необыкновенной (« $e$ », вектор поляризации вдоль оси  $Z$ ) или обыкновенной волне (« $o$ », вектор поляризации в плоскости  $UX$ ), задавалась поляризационной призмой 3. Для позиционирования исследуемого образца 6 с ППДС относительно падающего пучка и настройки по углу Брэгга на дифракционные максимумы он устанавливался на столик 7 с прецизионными механическими узлами. Измерения интенсивности света в дифракционных максимумах осуществлялись с помощью фотодиода 8 и микроамперметра 9. Состояние выходной поляризации в дифракционных максимумах определялась с помощью дополнительного анализатора, устанавливаемого между образцом 6 и фотодиодом 8.

В экспериментах по исследованию изотропной дифракции углы Брэгга хорошо соответствовали соотношению  $\sin \theta_g^{(p)} = p\lambda / (2\Lambda)$ , где  $p$  — порядок максимума при дифракции на составляющей спектра Фурье

с вектором  $\mathbf{K} = (2\pi/\Lambda)p\mathbf{x}^0$ , ориентированным вдоль оси  $X$ . Однако было обнаружено, что возмущения оптических свойств, создаваемые ППДС, обладают значительной неоднородностью вдоль координаты  $Z$ , проявляющейся при измерениях интенсивности дифракционных максимумов различных порядков. Наименьшая интенсивность для максимумов первого порядка ( $p = \pm 1$ ) и наибольшая во вторых порядках дифракции ( $p = \pm 2$ ) наблюдалась при позиционировании перетяжки зондирующего пучка примерно в середину образца между гранями, перпендикулярными оси  $Z$ . Как следует из соотношений (10) и (11), это соответствует ППДС, близкой к идеальной по расстоянию между доменными стенками двух типов, когда его отклонение  $\Delta x$  от значения  $\Lambda/2$  минимально. Все описанные ниже эксперименты проводились для данной области ППДС.

Анализ экспериментальных угловых зависимостей интенсивности в дифракционных максимумах первого и второго порядков при изотропной дифракции, как для обыкновенных, так и для необыкновенных волн, показал, что они хорошо согласуются с известными соотношениями [16] при длине взаимодействия, близкой к  $d = 2$  мм. Это свидетельствует о высокой однородности ППДС в исследуемой области образца во всем промежутке  $0 \leq y \leq d$ .

Результаты экспериментов по измерению эффективности изотропной дифракции Брэгга  $oo$  и  $ee$ , для обыкновенного и необыкновенного световых пучков соответственно, на составляющих фурье-спектра возмущений с пространственными частотами  $2\pi r/\Lambda$ , при значениях порядка дифракции  $p$  от 1 до 8, представлены в строках 2 и 3 таблицы 1. Эффективность дифракции для необыкновенных волн, определяемая компонентами тензора  $\Delta_{33}$ , здесь существенно превосходит таковую для обыкновенных волн, где основной вклад в дифракцию дает компонента  $\Delta_{e22}$  возмущений, создаваемых ППДС. Отношение этих эффективностей можно оценить, как  $(\Delta_{e33}^{m(1)} / \Delta_{e22}^{m(1)})^2$ . Поскольку основной вклад в возмущения данных компонент тензора диэлектрической проницаемости кристалла дает спонтанный квадратичный электрооптический эффект, то в соответствии с формулами (3) и (4) можно полагать, что  $\eta_{ee}/\eta_{oo} \approx (R_{33}/R_{13})^2$ . Соотношения, определяющие в сегнетоэлектрических связь коэффициентов линейного и квадратичного электрооптических эффектов [17],

Таблица 1. Эффективность брэгговской дифракции для световых пучков, распространяющихся в плоскости  $XU$  кристалла

$p$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\eta_{oo} \times 100$ эксперимент	0,219	0,526	0,113	0,028	0,045	0,010	0,003	0,002
$\eta_{ee} \times 100$ эксперимент	0,743	7,170	1,273	0,447	0,513	0,064	0,063	0,022
$\eta_{oe} \times 100$ эксперимент	—	—	—	0,102	0,023	0,025	0,006	0,002
$\eta_{oe} \times 100$ расчет	—	—	—	0,093	0,023	0,025	0,005	0,0024
$\eta_{eo} \times 100$ эксперимент	—	—	—	0,130	0,022	0,030	0,017	0,004
$\eta_{eo} \times 100$ расчет	—	—	—	0,134	0,022	0,030	0,0075	0,0043

позволяют получить из известных линейных электрооптических коэффициентов ниобата лития [18] значения  $R_{33} = 0,091 \text{ м}^4/\text{Кл}^2$  и  $R_{13} = 0,025 \text{ м}^4/\text{Кл}^2$  и найти квадрат их отношения как  $(R_{33}/R_{13})^2 = 12,8$ . Это значение удовлетворительно согласуется с данными таблицы 1 для порядков изотропной брэгговской дифракции  $p = 2, 3, 4, 5$  и  $8$ .

Векторная диаграмма  $\mathbf{k}_o = \mathbf{k}_e + 2\mathbf{K}$  (процесс типа  $e - o$ ) для анизотропной дифракции Брэгга необыкновенной волны с волновым вектором  $\mathbf{k}_e$  на второй пространственной гармонике фурье-спектра возмущений с волновым вектором  $2\mathbf{K}$  (порядок дифракции  $p = 2$ ), в результате которой возникает дифрагированная обыкновенная волна с вектором  $\mathbf{k}_o$  в кристалле ниобата лития, показана на рисунке 2. Однако используемый образец, вследствие преломления световых пучков на входной и выходной гранях, позволял реализовать процессы анизотропной дифракции типа  $o - e$  и  $e - o$  только для порядков анизотропной дифракции Брэгга  $p = 4, 5, 6, 7$  и  $8$ . Результаты измерений дифракционной эффективности в этих порядках, достигающей заметных величин, представлены в строках 4 и 6 таблицы 1.

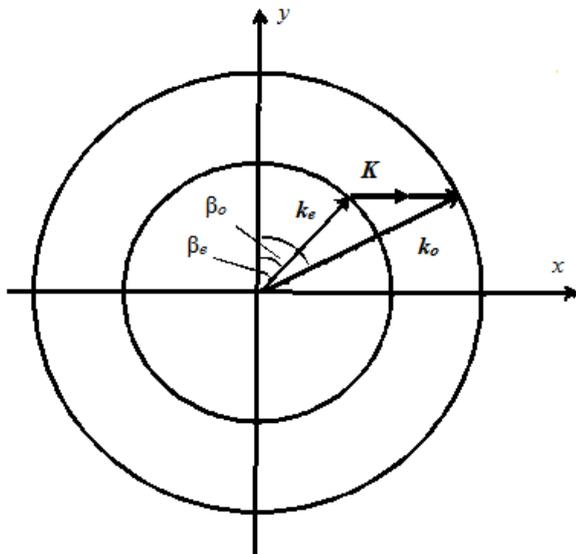


Рис. 2. Векторная диаграмма для анизотропной дифракции

Использование формул (4), (5) и (7) — (13) и известного подхода, основанного на уравнениях связанных волн (см., например, [16]), а также учет формул Френеля для преломления плоских волн на границе «кристалл — воздух», приводит к следующему выражению для эффективности дифракции Брэгга в случае процесса  $e - o$ :

$$\eta_{eo} = \left( \frac{\pi n_o n_e^2 d}{\lambda} \right)^2 \left| \frac{P_S}{2\omega_0} B_\alpha F_{ap} + P_S^2 B_S \operatorname{tg} \beta_o F_{sp} \right|^2 \times \left( \frac{\cos \beta_o}{n_o \cos \beta_e} \right)^2 \frac{\cos \beta_d}{\cos \beta_i} \times \left( \frac{\cos \beta_e + \sqrt{(1/n_e)^2 - \sin^2 \beta_e}}{(1/n_o) \cos \beta_o + \sqrt{(1/n_o)^2 - \sin^2 \beta_o}} \right)^2 \quad (14)$$

$$B_S = p_{41} \frac{d_{31}^S}{C_{11}^P}$$

$$B_\alpha = \frac{p_{44}(f_{1132} C_{14}^P - f_{3131} C_{66}^P) + p_{41}(f_{3131} C_{14}^P - f_{1132} C_{44}^P)}{C_{44}^P C_{66}^P - (C_{14}^P)^2} \quad (15)$$

где углы  $\beta_o$  и  $\beta_e$  определяют ориентацию волновых векторов  $\mathbf{k}_o$  и  $\mathbf{k}_e$  относительно оси  $Y$  в кристалле (рисунок 2),  $\beta_i$  — угол падения зондирующего пучка на входную грань кристалла  $y = 0$ ,  $\beta_d$  — угол преломления дифрагированного пучка на выходной грани  $y = d$  в воздухе, а коэффициенты разложения в ряд Фурье, соответствующие возмущениям компонент  $\Delta \epsilon_{23}^g = \Delta \epsilon_{32}^g$  и  $\Delta \epsilon_{13}^g = \Delta \epsilon_{31}^g$  определяются выражениями

$$F_{sp,ap} = \frac{1}{\Lambda} \int_{-\Lambda/2}^{\Lambda/2} \left[ \operatorname{ch}^{-2} \left( \frac{x + \Lambda/4 - \Delta x/2}{\omega_0} \right) \pm \operatorname{ch}^{-2} \left( \frac{x - \Lambda/4 + \Delta x/2}{\omega_0} \right) \right] \exp \left( -i \frac{2\pi}{\Lambda} x \right) dx \quad (16)$$

Использование формул (14) — (16) и аналогичных соотношений, полученных для дифракции Брэгга в случае процесса  $e - o$ , позволило провести численные расчеты дифракционных эффективностей  $oe$  и  $eo$ , результаты которых представлены в таблице 1 в строках 5 и 7, соответственно. При численном моделировании

использовались материальные параметры ниобата лития, соответствующие данным, приведенным в работах [19, 20]:  $P_S = 0,71 \text{ Кл/м}^2$ ,  $n_o = 2,274$ ,  $n_e = 2,187$ . Подгонка под экспериментальные данные приводила к минимальной ошибке при следующих параметрах исследуемой ППДС:  $\omega_0 = 0,315 \text{ мкм}$ ,  $\Delta x = 0,315 \text{ мкм}$ ,  $B_S = 1,8 \times 10^{-5} \text{ м}^4/\text{Кл}^2$  и  $B_a \approx 0 \text{ м}^3/\text{Кл}$ .

Таким образом, основной вклад в анизотропную дифракцию в исследованной геометрии вносят возмущения компонент  $\Delta \epsilon_{23}^g = \Delta \epsilon_{32}^g$  тензора диэлектрической проницаемости кристалла, создаваемые ППДС за счет эффектов электрострикции и фотоупругости, а вклад возмущений  $\Delta \epsilon_{13}^g = \Delta \epsilon_{31}^g$ , определяемых обратным флексоэлектрическим эффектом и фотоупругостью, является пренебрежимо малым

#### 4. Анализ возможности использования интерферометрических методов при исследованиях ППДС в ниобате лития

Рассмотрим возможность использования интерферометрического метода, например, использованного в работе [21], для исследования характеристик ППДС в линейном режиме. При распространении зондирующего светового пучка вдоль оптической оси  $Z$  образцов с ППДС, для описания волнового поля  $\vec{E}(x, z)$  в периодических структурах может быть использован подход, основанный на рассмотрении граничной задачи [12]. Добавляя к этому полю плоскую волну, распространяющуюся под небольшим углом  $\alpha$  к оси  $Z$  в плоскости  $YZ$  и рассчитывая численно распределение интенсивности суммарного светового поля при  $z = d$ , то есть на выходной грани кристалла, можно оценить возможность наблюдения интерференционной картины для рассматриваемой ППДС.

Полученная по данной методике карта уровней интенсивности для ППДС с пространственным периодом  $\Lambda = 19,43 \text{ мкм}$ , сформированной в пластине с толщиной  $d = 1 \text{ мм}$ , представлена на рисунке 3. В расчетах световое поле считалось поляризованным вдоль оси  $Y$ , и учитывалось, кроме падающего светового пучка, 18

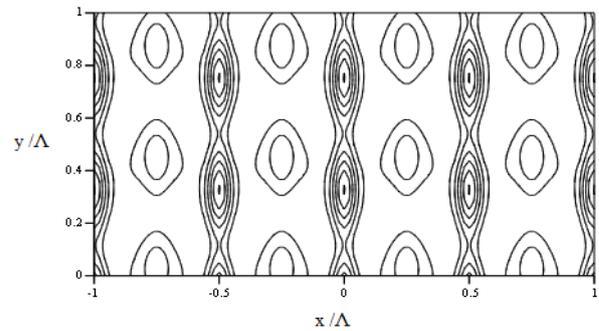


Рис. 3. Карта уровней интенсивности на выходном торце кристалла, при  $z = d$

Фурье-компонент в разложении для  $\epsilon_{22}(x)$ , что потребовало решения системы из 19 алгебраических уравнений. Рисунок 3 соответствует параметрам структуры  $\Delta x = 0$ ,  $\omega_0 = 32 \text{ нм}$ ; материальным константам  $P_S = 0,71 \text{ Кл/м}^2$ ,  $R_{13} = 0,025 \text{ м}^4/\text{Кл}^2$  и углу  $\alpha = 2^\circ$ . Как следует из рисунка 3, интерференционная картина отражает сложную фазовую структуру светового поля на выходной грани кристалла при изотропной дифракции на ППДС. Она проявляется, в частности, в появлении дополнительных максимумов интенсивности, локализованных вдоль линий  $x_m = \pm (\Lambda/4) \times (1 + 2m)$ , где  $m = 0, 1, 2, \dots$

#### Заключение

Таким образом, на создаваемых ППДС в кристаллах ниобата лития оптических возмущениях возможны различные виды линейной дифракции: с многими дифракционными максимумами, изотропная и анизотропная дифракция Брэгга, коллинеарная дифракция.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2017–2019 г.г. (№. 3.8898.2017/8.9, 3.4993.2017/6.7, 3.4973.2017/7.8), РФФИ (грант № 16-29-14046-офи\_м) и Правительства РФ (соглашение 02.A03.21.0006).

#### Список источников

- [1] **Catalan, G.** Domain wall nanoelectronics / G. Catalan, J. Seidel, R. Ramesh, J. F. Scott // *Reviews of Modern Physics*. — 2012. — Vol. 84. — № 1. — P. 119–156.
- [2] **Шур, В. Я.** Доменная нанотехнология в монокристаллах семейства ниобата лития и танталата лития / В. Я. Шур // *Наноматериалы и наноструктуры-XXI век*. — 2015. — Том 6. — № 2. — С. 38–45.
- [3] **Голенищев-Кутузов А. В., Голенищев-Кутузов В. А., Калимуллин Р. И.** Индуцированные домены и периодические доменные структуры в электро-и магнитоупорядоченных веществах / А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Р. И. Калимуллин // *Успехи физических наук*. — 2000. — Том 170. — № 7. — С. 697–712.
- [4] **Byer, R. L.** Quasi-phase-matched nonlinear interactions and devices / R. L. Byer // *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.* — 1997. — Vol. 6. — № 4. — P. 549–592.
- [5] **Suhara, T.** Theoretical analysis of waveguide second-harmonic generation phase matched with uniform and chirped gratings / T. Suhara, H. Nishihara // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. — 1990. — Vol. 26. — № 7. — P. 1265–1276.
- [6] **Myers, L. I.** Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub> / L. I. Myers, R. C. Eckardt, C. C. Fejer, R. L. Byer, W. R. Bosenberg, J. W. Pierce // *J. Opt. Soc. Am. B*. — 1995. — Vol. 12. — № 11. — P. 2102–2116.
- [7] **Yamada, M.** Electrically induced Bragg-diffraction grating composed of periodically inverted domains in lithium niobate crystals and its application devices / M. Yamada // *Rev. Sci. Instrum.* — 2000. — Vol. 71. — P. 4010–4016.

- [8] **Fejer, M. M.** Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation: Tuning and Tolerances / M. M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt, R. L. Byer // *IEEE J. of Quantum Electronics*. — 1992. — Vol. 28. — № 11. — P. 2631–2654.
- [9] **Aleksandrovskii, A. L.** Linear and nonlinear diffraction gratings in lithium niobate single crystals with periodically poled domain structure / A. L. Aleksandrovskii, O. A. Gliko, I. I. Naumova, V. I. Pryalkin // *Quantum Electronics*. — 1996. — Vol. 23. — № 7. — P. 657–659.
- [10] **Müller, M.** Investigation of periodically poled lithium niobate crystals by light diffraction / M. Müller, E. Soergel, K. Buse, C. Langrock, M. M. Fejer // *J. Appl. Phys.* — 2005. — Vol. 97. — № 4. — P. 044102.
- [11] **Shandarov, S. M.** Collinear and isotropic diffraction of laser beam and incoherent light on periodically poled domain structures in lithium niobate / S. M. Shandarov, A. E. Mandel, S. V. Smirnov, T. M. Akylbaev, M. V. Borodin, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics*. — 2016. — Vol. 496. — P. 134–142.
- [12] **Shandarov, S. M.** The linear diffraction of light waves on periodically poled domain structure in lithium niobate crystal / S. M. Shandarov, A. E. Mandel, A. V. Andrianova, G. I. Bolshaniin, M. V. Borodin, A. Yu. Kim, S. V. Smirnov, A. R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur // *Ferroelectrics*. — 2017. — Vol. 508. — P. 49–57.
- [13] **Ярив, А.** Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх; пер. С. Г. Кривошлыкова и Н. И. Петрова под ред. И. Н. Сисаяна — М.: Мир, 1987. — 616 с.
- [14] **Жирнов, В. А.** К теории доменных стенок в сегнетоэлектриках / В. А. Жирнов // *ЖЭТФ*. — 1958. — Том 35. — № 5. — С. 1175–1180.
- [15] **Шандаров, С. М.** Дифракция когерентных световых пучков на периодических доменных структурах в кристаллах ниобата лития / С. М. Шандаров, А. Е. Мандель, А. В. Андрианова, М. В. Бородин, Г. И. Большанин, А. Ю. Ким, С. В. Смирнов, А. Р. Атматханов, В. Я. Шур // Сборник трудов Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2014». Санкт-Петербург, 17–21 октября 2016; Под ред. проф. В. Г. Беспалова, проф. С. А. Козлова. — СПб: Университет ИТМО, 2016. — С. 150–152.
- [16] **Балакший, В. И.** Физические основы акустооптики / В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков — М.: Радио и связь, 1985. — 280 с.
- [17] **Сонин, А. С.** Введение в сегнетоэлектричество / А. С. Сонин, Б. А. Струков — М.: Высшая школа, 1970. — 271 с.
- [18] **Turner, E. H.** High-frequency electro-optic coefficients of lithium niobate / E. H. Turner // *Appl. Phys. Lett.* — 1966. — Vol. 8. — P. 303–304.
- [19] **Scrymgeour, D. A.** Phenomenological theory of a single domain wall in uniaxial trigonal ferroelectrics: Lithium niobate and lithium tantalite / D. A. Scrymgeour, V. Gopalan, A. Itagy, A. Saxena, P. J. Swart // *Physical Review B*. — 2005. — Vol. 71. — P. 184110.
- [20] **Dmitriev, V. G.** Handbook of Nonlinear Optical Crystals / V. G. Dmitriev, G. G. Gurdzanyan, D. N. Nikogosyan — Berlin: Springer-Verlag, 1991. — 413 p.
- [21] **Tarjányi, N.** Influence of surroundings on photorefractive effect in lithium niobate crystals / N. Tarjányi, I. Turek // *Physica B*. — 2012. — Vol. 407. — P. 4347–4353.

## Diffraction and interferometric methods for investigation of periodically poled domain structures in ferroelectric lithium niobate crystals

*S. M. Shandarov<sup>1</sup>, A. E. Mandel<sup>1</sup>, E. N. Savchenkov<sup>1</sup>, M. V. Borodin<sup>1</sup>, S. V. Smirnov<sup>1</sup>, A. R. Atmatkhanov<sup>2</sup>, V. Y. Shur<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

We consider the investigation methods based on linear diffraction of light waves, for the parameters of structures with 180-degree domain walls parallel to Z and Y crystallographic axes (Y-walls), which are created by electric poling in an external spatial-periodical field in the lithium niobate crystals. The results of experimental study of isotropic and anisotropic Bragg diffraction on periodically poled domain structures in the LiNbO<sub>3</sub>: 5 % MgO crystal are presented.

**Keywords:** Periodically poled domain structures, Bragg diffraction, Isotropic diffraction, Anisotropic diffraction, Lithium niobate.

#### 5.4. Оптимизация экспериментального электрооптического деспеклера на основе негеликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла

А. Л. Андреев<sup>1</sup>, Н. В. Заляпин<sup>1</sup>, Т. Б. Андреева<sup>1</sup>, И. Н. Компанец<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В экспериментальном образце деспеклера, представляющем собой электрооптическую ячейку с негеликоидальным жидким сегнетоэлектриком толщиной 20 мкм, при приложении электрического поля напряженностью порядка 3 В/мкм и частотой 2 кГц реализована пространственно-неоднородная фазовая модуляция лазерного пучка глубиной более  $\pi$ , позволившая осуществить подавление спекл-шума с эффективностью 10,7 дБ.

**Ключевые слова:** Голография, Спекл-шум, Деспеклер, Жидкий кристалл, Рассеяние света, Фазовая модуляция света, Разрушение когерентности пучка, Подавление спеклов.

##### Введение

В ФИАН в работах [1, 2] был предложен метод подавления спекл-шума в лазерных изображениях с помощью простого оптического модулятора — электрооптической ячейки, в которой использовался сегнетоэлектрический жидкий кристалл (СЖК) со спиральной (геликоидальной) структурой. Сфазированность волн в лазерном пучке и, соответственно, их способность интерферировать с образованием спекл-шума разрушалась в реальном времени при прохождении лазерного пучка через СЖК-ячейку при подаче на неё последовательности биполярных двухчастотных электрических импульсов специальной формы. Их воздействие приводит к формированию в слое СЖК пространственно неоднородных мелкомасштабных структур со случайным распределением градиентов показателя преломления, к хаотичной модуляции положения индикатрисы рассеяния СЖК, и как следствие, к фазовой модуляции света глубиной порядка и более  $\pi$ , пространственно неоднородной по апертуре ячейки.

Преимущества использования СЖК-ячейки в качестве деспеклера очевидны [3, 4]:

- по сравнению с механическими устройствами — вибрирующей мембраной или вращающейся фазовой маской, использование деспеклера на основе ЖК-ячейки обеспечивает простоту, стабильность и долговременную надежную работу;

- по сравнению с фазовым пространственным модулятором, формирующим ортогональные функции (фактически микродисплеем), обеспечивается существенное упрощение конструкции, технологии и электроники управления;

- по сравнению с фотополимерной средой, в которой в виде наложенных голограмм записаны многочисленные спекл-образы, в СЖК-деспеклере отсутствуют критичность к изменению длины волны, шумы и «усталость»;

- по сравнению со светорассеивающим диффузором, с рельефографическим модулятором света, представляющим собой отражательную дифракционную решетку, с методом сканирования лучей и перемещения их в волоконных световодах и трубках, с использованием лазеров с удвоением частоты и параметриче-

ской генерацией, СЖК-деспеклер является существенно более компактным и имеет меньшие потери света.

Важно также, что хорошо отработанная ЖК-технология позволяет варьировать размер апертуры СЖК-деспеклера от долей до нескольких квадратных сантиметров при толщине его 1–2 мм, включая чип управления.

В последующем параметры СЖК — оптического модулятора как деспеклера были улучшены при использовании электрооптической ячейки с негеликоидальным СЖК [4, 5], где спиральная структура молекул была компенсирована химическими добавками с обратным знаком оптической активности. Пространственно-неоднородная фазовая модуляция света в слое СЖК и подавление спекл-шума в формируемых лазером изображениях достигались одновременным воздействием высокочастотного (до 10 кГц) и низкочастотного (до 1000 Гц) импульсного питающего напряжения. Главными достоинствами модулятора, обусловленными отсутствием геликоида, явились отсутствие искажений в спектральном составе модулируемого светового излучения и отсутствие светорассеяния при выключении электрического поля. Кроме того, одинаковая форма импульсов низкочастотного и высокочастотного напряжения (меандр) позволила упростить электронную схему управления модулятора.

Учитывая прогресс, достигнутый при использовании негеликоидального СЖК, была проведена работа по оптимизации экспериментальных образцов электрооптического деспеклера и по его использованию в целях подавления спеклов. При этом была отработана методика регистрации изображений спекл-картин и их обработки с помощью специального программно-математического обеспечения. Результаты этой работы представлены ниже.

##### 1. Методика регистрации и обработки спекл-картин

Как и в большинстве работ, связанных с регистрацией и подавлением спеклов, применялась следующая методика: лазерный луч, прошедший через устройство подавления спеклов (деспеклер), направляется на ПЗС камеру, которая производит регистра-

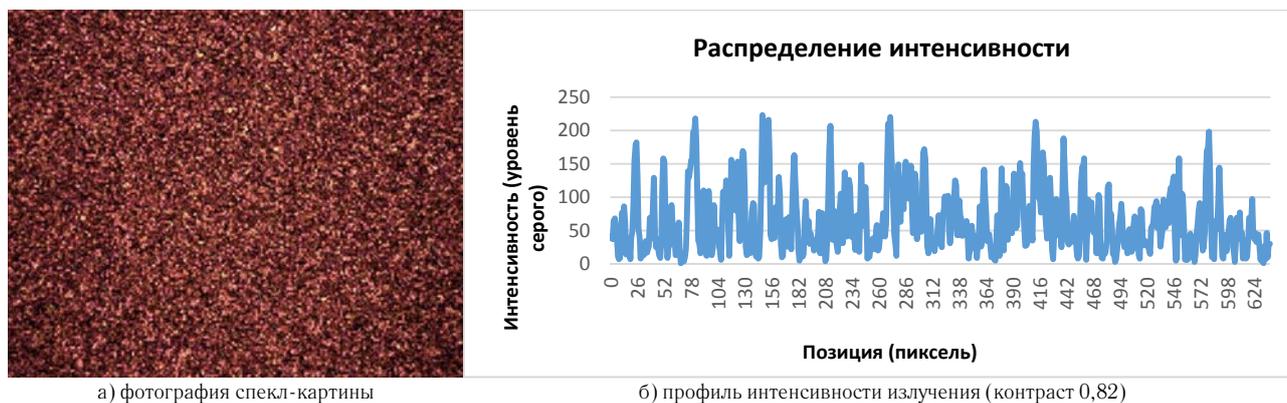


Рис. 1. Распределение интенсивность излучения ( $\lambda = 0,65$  мкм) в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку толщиной 13 мкм

цию распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка в отсутствие управляющего напряжения на электродах СЖК- ячейки (до подавления спеклов) и при его наличии (когда спеклы в той или иной степени подавлены).

Полученные изображения спекл-картин обрабатывались с помощью специально разработанной программы для расчета параметров спекл-структур (интенсивности, контраста, коэффициента ослабления спеклов), по которым строились профили распределения интенсивности в изображении лазерного пятна. Программа включала библиотеку Python Image Library (PIL) для работы с растровой графикой и изображениями [6], содержащую базовые функции обработки изображений, в том числе и возможность получения числового значения цветов (R, G, B) пикселя с использованием метода `getpixel(i, j)`, где  $i$  и  $j$  — координаты пикселя в изображении. По значениям R, G, B вычислялось значение интенсивности. Полученные данные (координаты пикселей и соответствующие им значения интенсивности) выгружались в создаваемый программой файл MS Excel. Для решения этой задачи использовалась библиотека xlwt, позволяющая создавать и заполнять файлы Excel.

Для вычисления контраста спекл-структур использовалось следующее соотношение:

$$C = \frac{\sigma}{\langle I \rangle}, \tag{1}$$

где  $\sigma$  — среднеквадратического отклонения флуктуации интенсивности,  $\langle I \rangle$  — среднее значение интенсивности. Теоретические значения контраста спекл-структур варьируются от 0 до 1 (максимально возможное значение  $C = 1$  достигается только в полностью развитых спекл-полях, наблюдаемых при дифракции широких лазерных пучков на сильно шероховатой поверхности или сильно рассеивающем транспаранте).

Эффективность уменьшения контраста спекл-структур рассчитывалась как отношение  $R$  (в децибелах) контраста спеклов  $C_1$  при выключенном деспеклере и контраста спеклов  $C_2$  при включенном деспеклере, а именно

$$R = 10 \log_{10} \left( \frac{C_1}{C_2} \right). \tag{2}$$

## 2. Экспериментальные результаты

В электрооптической ячейке с негеликоидальным СЖК при определённых условиях ещё в отсутствие электрического поля возникают периодические деформации смектических слоев, и как следствие — периодические изменения положения директора (главной оптической оси) вдоль каждого смектического слоя. В переменном электрическом поле переход к максвелловскому механизму диссипации энергии приводит к появлению структурно устойчивых волн стационарного профиля — динамических солитонов, вызывающих появление градиентов показателя преломления — центров рассеяния света (иначе, переходных доменов). Максимальной эффективности светорассеяния соответствует регулярная структура рассеивающих центров в виде циркулярных доменов, достаточно равномерно распределенных по объему СЖК. В зависимости от длительности управляющих импульсов напряжения и толщины слоя СЖК наблюдается несколько максимумов эффективности светорассеяния [7].

Переходы между светорассеивающими модами при воздействии импульсов напряжения, длительность которых соответствует различным максимумам эффективности светорассеяния, приводят к хаотичному изменению положения индикатрисы рассеяния. В результате кратковременного (порядка 50 мкс) включения светорассеяния в слое СЖК формируются пространственно неоднородные структуры с практически случайным распределением градиентов показателя преломления по объему, что, в свою очередь, является причиной пространственно неоднородной по сечению пучка фазовой модуляции света в электрооптической ячейке. Заметим, что такое кратковременное светорассеяние не чувствительно для глаз, не искажает структуру изображений, не влияет на их восприятие, и световые потери на него незначительны (менее 5 %).

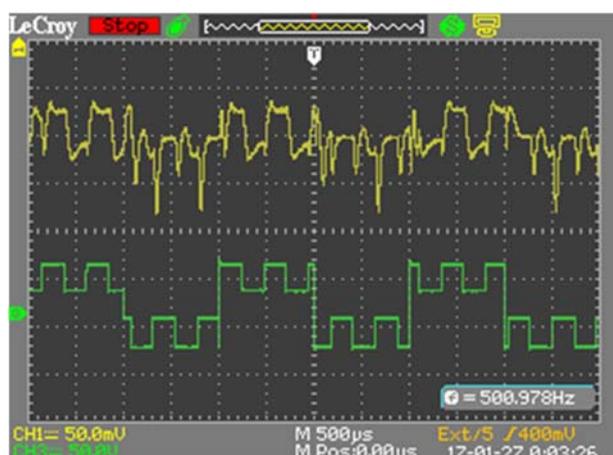


Рис. 2. Осциллограммы управляющего напряжения (в нижней части рисунка) и модуляции фазовой задержки (в верхней части рисунка) для электрооптической ячейки толщиной 13 мкм. Частота повторения низкочастотного сигнала (меандр) 500 Гц, амплитуда  $\pm 32$  В. Частота модулирующего сигнала (меандр) 2 кГц, амплитуда  $\pm 13$  В. Напряженность электрического поля 3,46 В/мкм

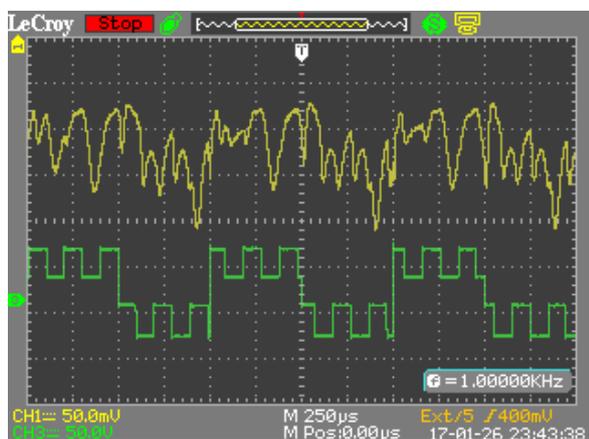


Рис. 3. Осциллограммы управляющего напряжения (в нижней части рисунка) и модуляции фазовой задержки (в верхней части рисунка) для электрооптической ячейки толщиной 16 мкм. Частота повторения низкочастотного сигнала (меандр) 1 кГц, амплитуда  $\pm 40$  В. Частота модулирующего сигнала (меандр) 5 кГц, амплитуда  $\pm 15$  В. Напряженность электрического поля 3,44 В/мкм

При отсутствии управляющего напряжения на электрооптической ячейке контраст зарегистрированной развитой спекл-структуры составлял 0,82 (рисунок 1).

Амплитуда, длительность, частота следования импульсов низкочастотного и высокочастотного напряжений и глубина модуляции выбирались таким образом, чтобы эффективность светорассеяния изменялась за время действия каждого импульса из последовательности, но не достигала бы своего максимального значения. Кроме того, вышеуказанные параметры подбирались таким образом, чтобы электрооптическая ячейка не работала в бистабильном режиме.

При амплитудной модуляции низкочастотного напряжения прямоугольной формы (меандр) высоко-



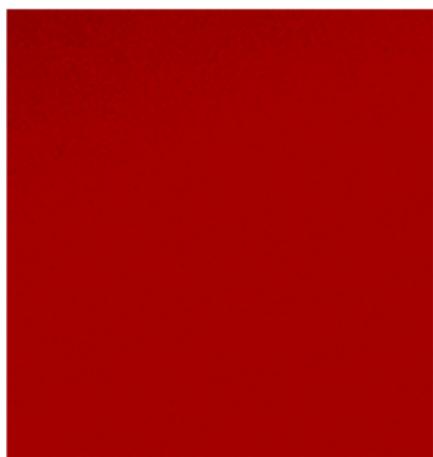
Рис. 4. Осциллограммы управляющего напряжения (в верхней части рисунка) и модуляции фазовой задержки (в нижней части рисунка) для электрооптической ячейки толщиной 20 мкм. Частота повторения низкочастотного сигнала (меандр) 2 кГц, амплитуда  $\pm 50$  В. Частота модулирующего сигнала (меандр) 7 кГц, амплитуда  $\pm 15$  В. Напряженность электрического поля 3,25 В/мкм

частотным напряжением той же формы, фазовая задержка слабо изменяется при смене полярности каждого следующего импульса высокочастотного напряжения (рисунок 2). Как следствие этого контраст спекл-структуры изменяется слабо — уменьшается до 0,2. Эффективность подавления спеклов, понимаемая как уменьшение контрастного отношения спекловой картины на рисунке 1, составила 4,4 дБ.

Для электрооптических ячеек, толщина которых находится в пределах 8—13 мкм, наблюдался один максимум эффективности светорассеяния. Второй максимум появляется при увеличении толщины ячейки до 15—17 мкм. Фазовая модуляция с высокой степенью неоднородности достигалась в такой ячейке при амплитудной модуляции низкочастотного управляющего напряжения (меандр с частотой 1 кГц), высокочастотным напряжением той же формы с частотой 5 кГц (рисунок 3). При подаче управляющего напряжения на электрооптическую ячейку, как и в предыдущем случае, контраст спекл-структуры составил 0,1, а эффективность уменьшения контраста 9,1 дБ.

Появление третьего максимума эффективности светорассеяния происходит при увеличении толщины электрооптической ячейки до 18 мкм. При толщине ячейки более 20 мкм первый максимум начинает смещаться в сторону более коротких импульсов. В этом случае увеличение длительности импульсов управляющего напряжения приводит к росту длины доменных границ и переходу к нерегулярным рассеивающим структурам. Вследствие этого плотность рассеивающих центров уменьшается, соответственно уменьшается и эффективность светорассеяния.

Фазовая модуляция с высокой степенью неоднородности достигнута в электрооптической ячейке толщиной 20 мкм при амплитудной модуляции низкочастотного биполярного напряжения (меандр) с частотой 2 кГц высокочастотным напряжением той же формы с частотой 7 кГц (рисунок 4). Контраст спекл-структуры



а) фотография сечения пучка



б) профиль интенсивности излучения (контраст 0,07)

Рис. 5. Распределение интенсивность излучения ( $\lambda = 0,65$  мкм) в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку толщиной 20 мкм

уменьшился до 0,07, а эффективность подавления спеклов составила 10,7 дБ. Эти результаты иллюстрируются на рисунке 5 сканом профиля интенсивности излучения ( $\lambda = 0,65$  мкм) в поперечном сечении прошедшего через ячейку лазерного пучка.

#### Заключение

В результате кратковременного (менее 50 мкс) включения светорассеяния в объеме СЖК формируются пространственно-неоднородные структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления, что, в свою очередь, является причиной пространственно-неоднородной по сечению пучка фазовой модуляции света в электрооптической ячейке.

Такая модуляция света в негеликоидальном СЖК позволила осуществить в электрическом поле напряженностью порядка 3 В/мкм эффективное подавление спекл-шума в поперечном сечении лазерного пучка: уменьшение контраста картины спеклов составило 10,7 дБ на частоте модуляции фазовой задержки 2 кГц, при отсутствии искажений в спектральном составе модулируемого излучения.

#### Благодарности

Авторы благодарят за поддержку работы Программу фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук.

#### Список источников

- [1] Андреев, А. Л. Подавление спекл-шума с помощью жидкокристаллической ячейки / А. Л. Андреев, И. Н. Компанец, М. В. Минченко, Е. П. Пожидаев, Т. Б. Андреева // Квантовая электроника. — 2008. — Том 38. — № 12. — С. 1166–1170.
- [2] Патент № 2 373 558 РФ. Научное изобретение / И. Н. Компанец, А. Л. Андреев. — Оpubл. 20.11.2009.
- [3] Andreev, A. L. Speckle-noise suppression due to a single ferroelectric liquid crystal cell / A. L. Andreev, T. B. Andreeva, I. N. Kompanets, M. V. Minchenko, E. P. Pozhidaev // Journal of the SID. — 2009. — Vol 17. — № 10. — P. 801–807.
- [4] Андреев, А. Л. Подавление спекл-шума с помощью ячейки негеликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла / А. Л. Андреев, Т. Б. Андреева, И. Н. Компанец, Н. В. Заляпин // Квантовая электроника — 2014. — Том 44. — № 12. — С. 1136–1140.
- [5] Патент № 2 561 307 РФ. Научное изобретение / И. Н. Компанец, А. Л. Андреев, Т. Б. Андреева. — Оpubл. 30.07.2015.
- [6] Python Image Library / URL: <http://www.pythonware.com/products/pil/>, <http://effbot.org/imagingbook/>, <http://www.python-excel.org/>.
- [7] Andreev, A. Fast bistable intensive light scattering in helix-free ferroelectric liquid crystals / A. Andreev, T. Andreeva, I. Kompanets, N. Zalyapin, H. Xu, M. Pivnenko, D. Chu // Applied Optics. — 2016. — Vol 55. — № 13. — P. 3483–3492.

## Optimization of the experimental electrooptical despeckler based on a helix-free ferroelectric liquid crystal cell

*A. L. Andreev<sup>1</sup>, N. V. Zalyapin<sup>1</sup>, T. B. Andreeva<sup>1</sup>, I. N. Kompanets<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

In the experimental sample of a despeckler, which is an electrooptical cell with the helix-free ferroelectric liquid crystal of 20  $\mu\text{m}$  thickness, the spatially inhomogeneous phase modulation of a laser beam with the depth of more than  $\pi$  was realized by applying an electric field of the order of 3 V/ $\mu\text{m}$  with a frequency of 2 kHz, that made it possible to suppress a speckle-noise with an efficiency of 10.7 dB.

**Keywords:** Holography, Speckle noise, Despeckler, Liquid crystal, Light scattering, Phase light modulation, Beam coherence destruction, Speckles suppression.

### 5.5. Голографический нанокomпозиционный материал

*Е. Б. Шекланова, М. И. Фокина, Ю. Э. Бурункова, В. О. Калябин, И. Ю. Денисюк*

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Материал представляет собой жидкую фоточувствительную мономерную композицию и содержит различные фотосенсибилизаторы и наночастицы. Принцип записи основан на перераспределении компонентов материала под действием излучения. Заданное распределение света вызывает самоорганизацию компонентов системы, образуя периодическое изменение показателя преломления в объеме материала. Запись возможна в видимой области на пленочной, бумажной или стеклянной подложке.

**Ключевые слова:** Оптика, Голография, Дифракционные оптические элементы, Нанокomпозиционный материал, Наночастицы, Трехмерная Трехмерная дифракционная решетка.

Голографический нанокomпозиционный материал относится к органическим светочувствительным регистрирующим средам, представляет собой мономерную композицию с нанонаполнителем и иницирующей системой, и позволяет получать фотополимеризационно-способные пленки для записи голограмм.

В общем виде голографический нанокomпозиционный материал состоит из:

- смеси мономеров акрилатной группы,
- наночастиц (ZnO, SiO<sub>2</sub> и Au);
- инициатора фотополимеризации.

Смесь мономеров выполняет роль матрицы, в которой происходит распределение наночастиц и наблюдается их стабилизация. Карбоновые кислоты (например, 2-Carboxyethyl acrylate) активно взаимодействуют с наночастицами и модифицируют их поверхность таким образом, что позволяют улучшить совместимость неорганических наночастиц с органической акриловой матрицей. Наличие в растворе другого мономера,

например, Bisphenol A glycerolate, позволяет формировать полимерную сетку. Показатель преломления наночастиц существенно отличается от показателя преломления мономерной матрицы, что определяет значительную величину модуляции показателя преломления при перераспределении наночастиц [1, 2].

При записи голограммы заданное распределение света вызывает перераспределение компонентов системы, образуя периодическое изменение показателя преломления в объеме материала, поскольку происходят следующие процессы, обуславливающие запись голограммы: в светлых областях интерференционной картины начинается фотополимеризация; химическое взаимодействие мономер-наночастица и полимер-наночастица различно, в частности взаимодействие сильнее в системе, мономер-наночастица, в результате происходит диффузия наночастиц из светлых, полимеризованных, в темные, неполимеризованные области, приводящая к модуляции показателя преломления в объеме материала. В результате создается объемная фазовая дифракционная решетка [3].

Данный материал и записанные на нем голограммы имеют ряд дополнительных преимуществ по сравнению с известными материалами:



а) прозрачный жидкий нанокomпозиционный материал



б) материал с различными красителями и наночастицами

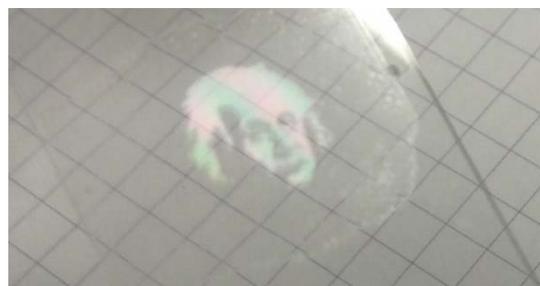


Рис. 2. Изображение, записанное голографическим методом

Рис. 1. Голографический нанокomпозиционный материал

1) высокая термостойкость, записанная голограмма выдерживает нагрев до 150 °С в течение 5 минут без потери дифракционной эффективности, что обусловлено отсутствием термопластических компонентов в составе композиции и необратимым перемещением наночастиц в объеме материала;

2) влагостойкость композиции существенно выше, чем у известных голографических полимеров, по

причине отсутствия в составе композиции гидрофильных составляющих и наличия неорганических наночастиц, химически связанных с полимером;

3) при записи голограмм не требуется темного помещения;

4) возможно использование пленочной и стеклянной подложки, а также бумаги с подходящими механическими и печатно-техническими свойствами.

#### Список источников

- [1] Патент № 2 541 521 РФ. Жидкая композиция для фотополимеризационноспособной пленки для записи голограммы, способ получения композиции, способ получения вышеуказанной пленки / И. Ю. Денисюк и др. — Оpubл. 20.02.2015.
- [2] Патент № 2 541 521 РФ. Жидкая композиция фотополимеризационноспособной пленки для записи голограммы, способ получения композиции / Ю. Э. Бурункова и др. — Оpubл. 10.02.2016.
- [3] Бурункова Ю. Э. Голографический нанокомпозит и дифракционный элемент на его основе / Ю. Э. Бурункова и др. // Оптика и спектроскопия. — 2017. — Том 122. — № 2. — С. 349–351.

## Holographic nanocomposite material

*E. B. Sheklanova, M. I. Fokina, J. A. Burunkova, V. O. Kaliabin, I. Y. Denisiuk*

Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

The material is a liquid photosensitive monomer composition and contains a variety of photosensitizers and nanoparticles. The principle of recording based on the redistribution of material components under the action of radiation. The specified distribution of light causes the self-organization of the system components, forming a periodic change of refractive index in the volume of material. Recording is possible in the visible region on film, paper or glass substrate.

**Keywords:** Optics, Holography, Diffractive optical elements, Nanocomposite material, Nanoparticles, Three-Dimensional diffraction grating.

### 5.6. Трехмерные нанокпозиционные голограммы

*Е. Б. Шекланова, М. И. Фокина, Д. И. Жук, Ю. Э. Бурункова, В. О. Калябин, И. Ю. Денисюк*  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

В докладе рассматриваются трехмерные голограммы, записанные на разработанном нанокпозиционном материале, а также различное возможное применение таких голограмм.

**Ключевые слова:** Оптика, Голография, Дифракционные оптические элементы, Нанокпозиционный материал, Наночастицы, Трехмерные голограммы, Голографические защитные элементы.

Голографический нанокпозиционный материал представляет собой мономерную композицию с нанонаполнителем и иницирующей системой. [1, 2]

При записи голограммы заданное распределение света вызывает перераспределение компонентов системы, образуя периодическое изменение показателя преломления в объеме материала. В результате создается объемная фазовая дифракционная решетка. [3]

В докладе рассматриваются следующие элементы и возможности их применения:

1) защитные элементы на основе объемной голографической дифракционной решетки — фотополиме-

ризация нанокпозиционита обеспечивает прочное его соединение с подложками любых типов во время записи голограммы, попытка отделить голограмму приводит к ее разрушению;

2) трехмерная голограмма — в отличие от элемента на основе объемной голографической решетки содержит информацию в виде трехмерного изображения и позволяет вводить в изображение скрытую информацию;

3) элемент, состоящий из микроголограмм, представляющий из себя полимерную пленку.



а) персонифицированный элемент

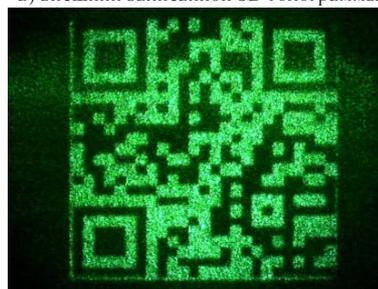


б) элемент на бумажной подложке

Рис. 1. Голографические защитные элементы на бумажной подложке



а) внешний записанной 3D голограммы



б) распознанное изображение

Рис. 2. Трехмерная нанокпозиционная голограмма

#### Список источников

- [1] Патент № 2 541 521 РФ. Жидкая композиция для фотополимеризационноспособной пленки для записи голограммы, способ получения композиции, способ получения вышеуказанной пленки / И. Ю. Денисюк и др. — Оpubл. 20.02.2015.
- [2] Патент № 2 541 521 РФ. Жидкая композиция фотополимеризационноспособной пленки для записи голограммы, способ получения композиции / Ю. Э. Бурункова и др. — Оpubл. 10.02.2016.
- [3] Бурункова Ю.Э. Голографический нанокпозиционит и дифракционный элемент на его основе / Ю. Э. Бурункова и др. // Оптика и спектроскопия. — 2017. — Том 122. — № 2. — С. 349–351.

## Three-dimensional nanocomposite holograms

*E. B. Shekhanova, M. I. Fokina, D. I. Zhuk, J. A. Burunkova, V. O. Kaliabin, I. Y. Denisiuk*

Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

Holographic nanocomposite material is a monomeric composition with nanofiller and the initiating system. The specified distribution of light causes a redistribution of the system components, forming a periodic change of refractive index in the volume of material during recording of the hologram. The result is a volume phase diffraction grating. The report addresses the following elements and their possible applications: 1) protective elements on the basis of volume holographic diffraction gratings (photo-polymerization of nanocomposite delivers a solid connection with the substrates of any type during recording of the hologram, the attempt to separate the hologram leads to its destruction); 2) three-dimensional hologram (in contrast to object on the basis of the volume holographic grating contains information in the form of three-dimensional images and allows to enter hidden information in to the image); 3) element consisting of microholograms, representing a polymer film.

**Keywords:** Optics, Holography, Diffractive optical elements, Nanocomposite material, Nanoparticles, Three-Dimensional holograms, Holographic protective elements.

### 5.7. Особенности создания дифракционного микрорельефа на поверхности пищевых продуктов

А. П. Торопова, М. И. Фокина

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Исследование направлено на объединение оптических и пищевых технологий. На поверхности пищевых продуктов наносится дифракционная решетка с целью получения ярких радужных изображений без использования пищевых красителей. В качестве исследуемых материалов: шоколад, желирующие агенты, карамель.

**Ключевые слова:** Радужная голограмма, Дифракционная решетка, Карамель, Шоколад, Желирующие агенты.

Применение междисциплинарных исследований в традиционных областях деятельности позволяют сегодня добиться неожиданных результатов, потому что соединяет знания из разных областей. В данном исследовании сделана попытка объединить оптические и пищевые технологии в целях создания инновационного продукта — съедобной голограммы, которая позволяет сформировать на поверхности пищевого материала цветное изображение за счет рельефа, исключая пищевые красители, которые могут негативно влиять на здоровье людей. Съедобная голограмма придает новые эстетические свойства привычным продуктам. Съедобная радужная голограмма может быть использована для защиты продуктов и медикаментов от подделок.

Разработка съедобных голограмм имеет многолетнюю историю, которая начинается с патента Эрика Беглейтера «Голографические продукты», опубликованного в США в 1987 году [1]. Этому же автору принадлежат вышедшие позже патенты о применении голографических технологий в пищевой промышленности и фармацевтике [2, 3]. Технология защиты фармацевтических продуктов с помощью нанесения на них голограмм получила своё развитие в патентах [4, 5]. Идея создания съедобных голограмм для пищевой промышленности и расширение методов декорирования в кондитерском деле раскрывается в патентах [6, 7] и лежит в основе исследований учёных из Мексики [8]. Опыты с различными материалами проводились в разное время в Германии, Кореи, Японии, Китае, но тео-

ретического анализа и практического алгоритма создания съедобных голограмм пока не разработано. Нет конкретных характеристик материалов, не описаны особенности работы с ними. Информации о коммерческом использовании результатов этих исследований и изобретений выявлено не было. В 2012 году швейцарская фирма Morphotonix выпустила коммерческий продукт Holographic chocolate — шоколад с радужными голограммами, однако результатов их научной деятельности в виде статей или патентов найдено не было. Идея создания съедобной голограммы на основе шоколада, карамели и желирующих агентов как коммерческого продукта, готового к выпуску на рынок, остается актуальной.

Для проведения настоящего исследования с дифракционных решеток с разным периодом сделаны силиконовые формы, с помощью которых приготовлены образцы из шоколада, карамели, желирующих агентов. Затем были оценены показатели преломления и вязкости материалов, сняты спектры пропускания, проведен дифференциально-термический анализ, а также выполнена визуальная оценка и оценка дифракционной эффективности образцов.

Для того, чтобы выяснить, какая решетка создает наиболее яркий визуальный эффект выбраны 3 дифракционные решетки с 1750 л/мм, 1250 л/мм и 600 л/мм. На рисунке 1 показаны фотографии силиконовых слепков с дифракционных решеток.

В силиконовые формы был залит темперированный шоколад, застывшие образцы которого передавали рельеф дифракционной решетки. На рисунке 2

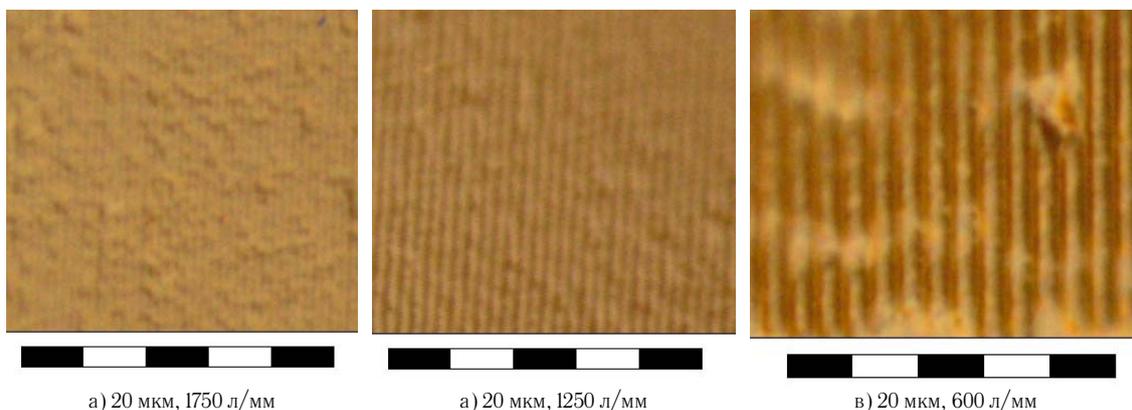


Рис. 1. Фотографии силиконовых слепков, снятых с дифракционных решеток

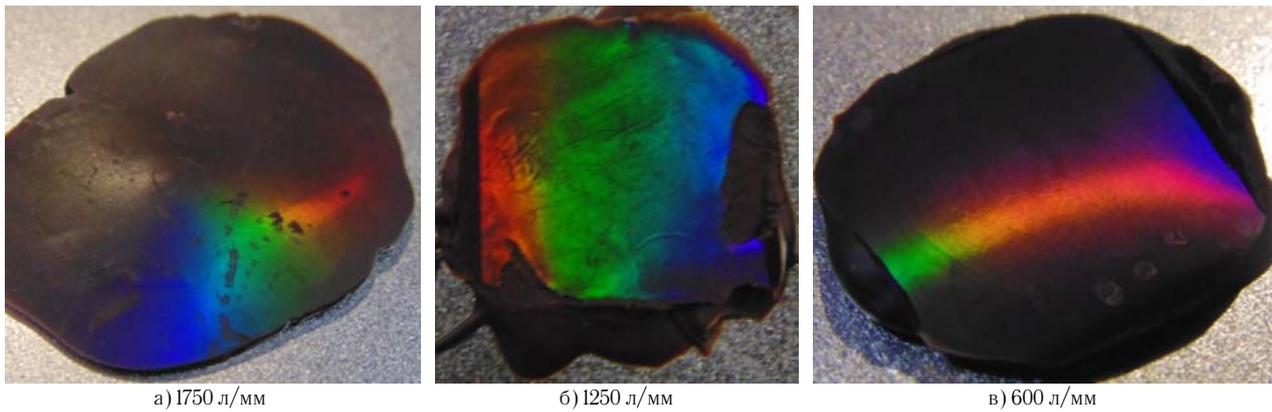


Рис. 2. Фотографии образцов шоколада с разными решетками

Таблица 1. Требования к точности изготовления и сборки

Содержание какао-продуктов, %	Дифракционная эффективность, %
97 %	18 %
80 %	20 %
77 %	17 %
75 %	18 %
72 %	17 %
49 %	17 %
39 %	11 %

Таблица 2. Дифракционная эффективность решетки на поверхности пленок из разных желирующих агентов

Желирующий агент	Дифракционная эффективность, %
Желатин	27,51
Пектин	0,55
Агар-агар	1,42
Ксантановая камедь	1,12
Трагакантовая камедь	8,16
Гуаровая камедь	0,20

Таблица 3. Дифракционная эффективность образцов из карамели с различными видами патоки

Состав	Дифракционная эффективность, %
Сахар, вода, крахмальная мальтозная патока	5 %
Сахар, вода, кукурузный сироп	13 %
Сахар, вода, крахмальная карамельная патока	5 %

видно, что наиболее яркие визуальные эффекты возникли при использовании решеток с 1250 и 600 л/мм. Дальнейшее исследование проводилось с решеткой 600 л/мм, которая позволила получить на поверхности шоколада зеленые, желтые, оранжевые, красные, розовые и синие оттенки.

Из семи видов шоколада с разным процентным содержанием какао-продуктов сделаны образцы и измерена дифракционная эффективность. Согласно значениям, приведенным в таблице 1, максимальная дифракционная эффективность соответствует образцу с 80 % содержания какао-продуктов (рисунок 3а),

наименьшая дифракционная эффективность соответствует образцу с 39 % содержания какао-продуктов. Дифракционная решетка держалась на шоколаде в течение достаточно длительного времени — трех месяцев, поэтому шоколад, декорированный с использованием дифракционного рельефа, может быть применен для создания оригинальных визуальных эффектов в кондитерском деле, а также может рассматриваться как новый продукт на рынке кондитерских сувениров.

Из желирующих веществ — желатина, пектина, агар-агара, гуаровой, ксантановой, трагакантовой камедей сделаны образцы пленок с дифракционными решетками. Эти вещества имеют различную способность к растворению в воде, поэтому были подобраны такие пропорции жидкости и сухого вещества, при которых образовывались однородные гели. Небольшое количество геля помещалось на лавсановую пленку и накрывалось силиконовой формой, снятой с дифракционной решетки. После высыхания пленок была измерена дифракционная эффективность полученных решеток, значения которой представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, наибольшей дифракционной эффективностью обладают образцы из раствора желатина. Пленки, изготовленные из желирующих агентов, очень тонкие и хрупкие, они ломаются при попытке снять их с поверхности, на которой они были приготовлены, поэтому более целесообразно наносить гель и формировать дифракционный рельеф на поверхности самого кондитерского изделия или лекарственного препарата. В результате создается не пленка, требующая прикрепления, а готовое голографическое покрытие. Этот способ был успешно использован для нанесения дифракционной решетки на поверхность марципана и желатиновой капсулы. На рисунке 2б приведена фотография капсулы с дифракционной решеткой.

Для исследования дифракционной решетки на карамели были изготовлены образцы из сахара, воды, кукурузного сиропа, крахмальной мальтозной патоки и крахмальной карамельной патоки. Сваренная карамель залита в силиконовую форму, отвердевшие образцы, сохранившие рельеф дифракционной решетки измерены на дифракционную эффективность, значения которой представлены в таблице 3.



а) Образец из шоколада

б) Образец из желатиновой пленки на поверхности капсулы

в) Образец из карамели

Рис. 3. Фотографии образцов из разных материалов с дифракционными решетками

Наибольшую дифракционную эффективность имеют образцы из сахара, воды и кукурузного сиропа. Несмотря на малые значения дифракционной эффективности радужный эффект является хорошо различимым визуально (рисунок 3в). Карамель способна передавать рельеф, но не способна сохранять его длительное время. Срок жизни этих образцов достигает 40 часов, что сравнимо со сроком годности кондитерских изделий, содержащих сливочный, заварной, творожный, йогуртовый кремы. Карамельные украшения с радужной голограммой могут быть использованы как индикаторы срока годности и соблюдения условий хранения скоропортящихся продуктов, например, тортов, поскольку такие «голографические датчики» чувствительны к перепадам температуры и влажности.

Таким образом, радужная голограмма, выполненная на нетрадиционных пищевых материалах: шоколаде, карамели, желирующих агентах — имеет достаточную дифракционную эффективность, обеспечивающую яркий визуальный эффект. Съедобные радужные голограммы могут быть полезны для контроля качества пищевых продуктов и соблюдения условий их хранения, для идентификации лекарственных препаратов и, соответственно, уменьшения доли фальсификата на фармацевтическом рынке, для создания оригинальных сувениров, красивых и безопасных конфет и других изделий индустрии удовольствия.

#### Список источников

- [1] Патент № 4 668 523 US. Holographic Products / E. Begleiter. — Оpubл. 26.05.1987.
- [2] Патент № 7 083 805 US. Edible holographic products, particularly pharmaceuticals and methods and apparatus for producing same / E. Begleiter. — Оpubл. 01.08.2006
- [3] Патент № 2004 0 170 725 US. Edible articles that include edible optical elements and methods for producing same / E. Begleiter. — Оpubл. 2.09.2004
- [4] Патент № 102 007 026 969 DE. A process for producing a diffractive grating microstructure on the surface of a tablet / W. Harald. — Оpubл. 05.04.2012
- [5] Патент № 2009 155 397 WO. Edible holographic silk products / F. Omenetto, D. L. Kaplan. — Оpubл. 23.12.2009.
- [6] Патент № 2005 003 102 KR. The hologram candy / K. S. Han — Оpubл. 01.04.2005.
- [7] Патент № 2005 253 340 JP. Chocolate with hologram pattern, method for producing the same and mold used for the method / N. Shuichiro, T. Kiriko — Оpubл. 22.09.2005
- [8] Ponce-Lee, E.L., Sugar (sucrose) holograms / E. L. Ponce-Lee, A. Olivares-Pérez, I. Fuentes-Tapia // Optical Materials — 2004. — Vol. 26. — P. 5–10.

### Features of the creation of a diffraction microrelief on the food products surface

*A. P. Toropova, M. I. Fokina*

Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

The research is aimed at combining optical and food technologies. On the surface of food products, a diffraction grating is applied to produce bright rainbow images without the use of food dyes. The studied materials are chocolate, gelling agents, caramel.

**Keywords:** Rainbow hologram, Diffraction grating, Caramel, Chocolate, Gelling agents.

## 5.8. Стабилизация желатиновых голограмм и их защита от атмосферной влаги

*А. Н. Малов*

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск Россия

Свойства желатиновых слоев существенно зависят от их влагосодержания. Поэтому галогидосеребряные и желатиновые голограммы нуждаются в защите от действия паров воды. Рассматриваются различные технологии стабилизации свойств и защиты голограмм от влияния атмосферной влажности. Обсуждаются физико-химические методы формирования поверхностной сильно задубленной мембраны в растворах дубителей и при ИК и УФ облучении, пропитка голограмм триэтаноламином (ТЭА), прокаливание слоя и вакуумная сушка. Рассматриваются способы ламинирования желатиновых голограмм кремнийорганическими и иммерсионными лаками. Особое внимание уделено вопросам воспроизводимости свойств желатиновых слоев.

**Ключевые слова:** Голограмма, Желатин, Дубление, Влажность, Ламинирование, Воспроизводимость, Лазер.

## Stabilization of gelatin holograms and their protection against the atmospheric humidity

*A. N. Malov*

Irkutsk National Research Technical University Irkutsk, Russian Federation

Properties of gelatin layers essentially depend on them moisture content. Therefore silver halide and gelatin hologram's require protection against atmospheric humidity action. Various technologies of properties stabilization and protection of holograms against influence of atmospheric water vapors are considered. Physical and chemical methods of formation superficial strongly hardening membranes in special solutions are discussed and at IR or UV irradiation, a hologram impregnation by triethanolamin (TEA), a layer temperature quench and vacuum drying. Ways of lamination of gelatin hologram by silicon organically and immersion varnishes are considered. The special attention is given questions of gelatin layers properties reproducibility.

**Keywords:** hologram, gelatin, hardening, humidity, lamination, reproducibility, the laser.

### 5.9. Лазер с обращением волнового фронта для записи голограмм

*И. А. Горбунова, С. О. Поташин, А. П. Погода, А. В. Федин, А. С. Борейшо*

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

В работе показана возможность использования мощного твердотельного Nd–YAG лазера с петлевым резонатором для записи голограмм. Наличие требуемой длины когерентности и пространственного качества обеспечивается как естественное следствие дифракции излучения на самонакачивающихся динамических решетках коэффициента усиления, записываемых непосредственно в активной среде внутрирезонаторными пучками.

#### Введение

Лазеры для записи голограмм должны отвечать следующим критериям: иметь достаточную для записи длину когерентности, что диктует жесткие требования к ширине спектра излучения, а также иметь качество излучения близкое к дифракционному пределу.

#### 1. Лазеры с обращением волнового фронта

Одним из перспективных устройств получения излучения с подходящими для записи голограмм параметрами является лазер с генерацией на основе метода обращения волнового фронта. Разработана линейка мощных импульсных твердотельных Nd–YAG лазеров с обратной связью на основе динамических самонакачивающихся решеток коэффициента усиления, записанных непосредственно в активной лазерной среде [1, 2].

Решетки коэффициента усиления за счет энергообмена между внутрирезонаторными пучками в результате четырехволнового смешения обеспечивают обратную связь в петлевом резонаторе [ссылка]. Это дает возможность осуществить генерацию в резонаторе без выходного зеркала. Более того, в отличие от традиционных лазеров, где рост мощности излучения как правило приводит к падению пространственного качества, в случае лазеров с обращением волнового фронта, дифракционная эффективность решеток, а соответственно и степень коррекции искажений, растет с ростом интенсивности внутрирезонаторного излучения [ссылка]. В результате чего возможно осуществлять генерацию с высокой мощностью или энергией в импульсе при сохранении качества излучения близкого к дифракционному пределу.

Так же, решетки коэффициента усиления, и конкуренция продольных мод в процессе снятия инверсии населенностей, приводят к эффективной селекции одной продольной моды излучения в импульсе генерации в случае, когда выходное зеркало отсутствует. Длина волны излучения меняется от импульса к импульсу в диапазоне линии генерации лазера с плоским резонатором, так как выбор волны, наиболее эффективно снимающей инверсию, является случайным фактором, а резонатор не накладывает никаких ограничений на параметры записываемой решетки. При этом показана возможность стабилизации частоты излучения лазера стационарной брэгговской решеткой, записанной в фототерморефрактивном стекле.

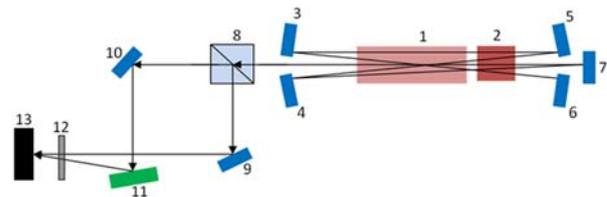
Поскольку наблюдается рост обратной связи по мере записи самонакачивающейся динамической решетки, имеет место самомодуляция добротности за счет снижения порога генерации в ходе развития импульса. Для того, чтобы повысить энергию в импульсе и пиковую мощность возможно использовать пассивную или активную модуляцию добротности. Пассивная модуляция определяется материалом и начальным пропусканием лазерных затворов LiF: F<sup>2+</sup> и YAG: Cr<sup>4+</sup>, а также энергией и длительностью импульса накачки, приводит к возможности подбора энергии в импульсе и пиковой мощности под конкретную задачу [3].

В результате возможно реализовать лазер, работающий в режиме пассивной модуляции добротности, с энергией в импульсе до 230 мДж и параметром качества излучения M<sup>2</sup> менее 1,2. Ширина полосы одномодовой генерации при этом не превышает 1 ГГц [2].

#### 2. Запись голограмм

Для исследования возможности записи голограммы была выбрана конфигурация лазера, представленная на рисунке 1. Активный элемент 1 — это кристалл Nd–YAG (легирование 0,6 %) цилиндрической формы длиной 130 мм и диаметром равным 8 мм, с матированной боковой поверхностью. Поперечная накачка осуществлялась двенадцатью импульсными матрицами лазерных диодов суммарной пиковой мощностью до 26 кВт. Пассивный лазерный затвор LiF: F<sup>2+</sup> с начальным пропусканием 30 % 2 установлен в пересечение внутрирезонаторных пучков. Излучение, развивающееся из спонтанной люминесценции, последовательно отражается от зеркал 3–7.

Выходящий из резонатора пучок лазерной генерации попадает на светоделительный куб 8, в результате чего делится на два равных по интенсивности пучка: опорный и объектный. Опорный пучок отражается от зеркала 9 и пересекается с объектным пучком. Объектный пучок отражается от зеркала 10 и попадает на



1 — Квантрон, 2 — ПЛЗ, 3–7, 9–10 — дихроичные зеркала, 8 — светоделительный куб, 11 — объект, 12 — светофильтр, 13 — ПЗС-камера

Рис. 1. Оптическая схема установки для записи голограмм

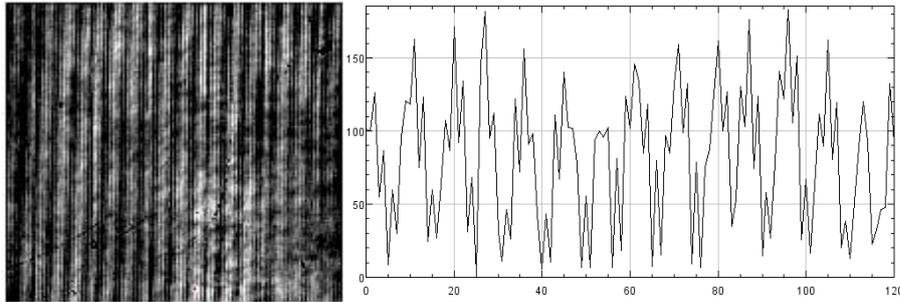


Рис. 2. Интерференционная картина двух плоских волн

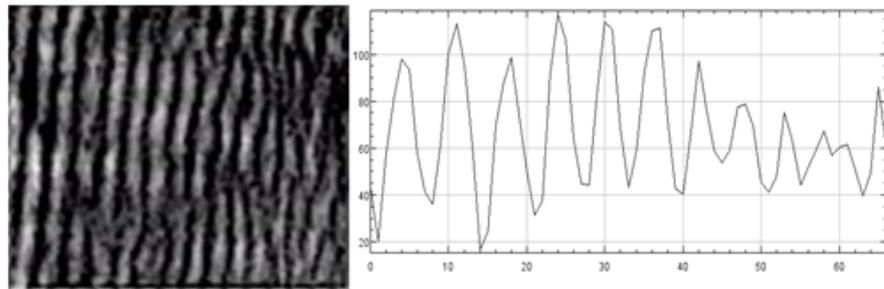


Рис. 3. Интерференционная картина от зеркала с поверхностным дефектом

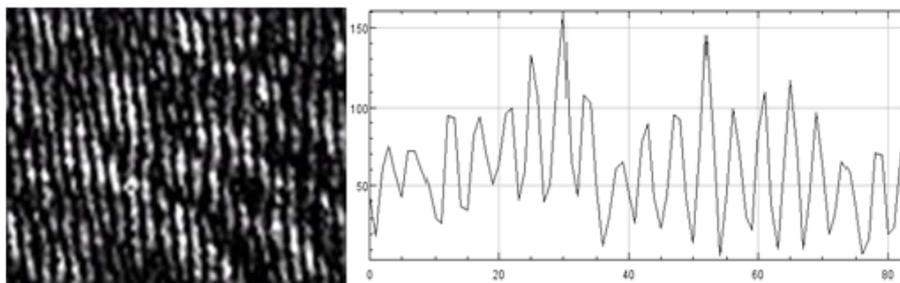


Рис. 4. Интерференционная картина от части крыла орла монеты номиналом 5 рублей

объект (II). Рассеянная на объекте часть излучения интерферирует с опорным пучком. Для ослабления излучения применяется нейтральный фильтр 12. Регистрация интерференционной картины производится ПЗС-матрицей камеры BeamGage SP620U, Orphir-Spiricon 13.

На рисунке 2 представлен результат интерференции опорного и объектного пучков в отсутствии объекта, а на рисунке 3 — интерференционная картина, записанная излучением, рассеянным специально созданным изъяном (выемка) на зеркале 9.

Интерференционная картина излучения, рассеянного от зеркала с искусственно сделанным дефектом, обладает довольно высоким контрастом. Так же наблюдаются явные искажения интерференционных полос, которые обусловлены неровностью поверхности (выемкой). Следовательно, если за место камеры

установить фоточувствительную пластинку, появится возможность получить голограмму дефекта.

На рисунке 4 представлен результат интерференции опорного и объектного пучка при наличии объекта. В качестве объекта выступает монета номиналом 5 рублей. Рассеяние света осуществлялось от части крыла орла на монете. Интерференционная картина имеет мелкодисперсную волнистую структуру, которая отражает ребристую поверхность подсвечиваемой части монеты.

### Заключение

В результате показано, что возможно производить запись голограмм мощным импульсным Nd—YAG лазером с многопетлевым резонатором, осуществляющим обращение волнового фронта.

### Список источников

- [1] **Pogoda, A. P.** / A. P. Pogoda, V. F. Lebedev, P. S. Makarchuk, S. N. Smetanin, A. S. Boreysho // Optical Memory and Neural Networks. — 2013. — Vol 22. — № 4. — P. 267–271.
- [2] **Бурковский, Г. В.** / Г. В. Бурковский, А. В. Федин, А. П. Погода, А. С. Борейшо // Квантовая электроника. — 2016. — Том 46. — № II. — С. 976–978.
- [3] **Погода, А. П.** / А. П. Погода, Г. В. Бурковский, П. С. Макачук, И. С. Хахалин, А. С. Борейшо, А. В. Федин // Письма в журнал технической физики. — 2016. — Том 42. — № 6. — С. 35–41.

## **Phase-conjugate laser for holographic application**

*A. Pogoda, I. Gorbunova, S. Potashin, A. Fedin, A. Boreysho*

Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D. F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia

The work shows the possibility of hologram recording by the powerful solid-state Nd–YAG laser with a loop cavity. Due to the diffraction of radiation by self-pumped dynamic gain gratings, laser radiation has enough coherence length and spatial quality for the holographic application.

## 5.10. Обоснование возможности изготовления полноцветной изобразительной голограммы с использованием цветной интерференционной фотографии Липпмана

*А. И. Шварцвальд*

Университет города Переславля имени А. К. Айламазяна, Переславль-Залесский, Россия

Рассмотрен процесс изготовления полноцветной объёмной голограммы с использованием цветной интерференционной фотографии Липпмана в качестве отражательного фильтра, источника полноцветного изображения и интерференционного слоя, создаваемого селективно отражёнными фотонами при освещении белым светом. Определён круг задач для практического осуществления процесса.

**Ключевые слова:** Голография, Интерференционная фотография, Полноцветная объёмная голограмма, Сканирование объёмного объекта, Фотонаборное экспонирование голограммы, Объёмная фотография.

Принципиальная невозможность изготовления полноцветных голограмм традиционным методом цветного голографического процесса с применением цветных лазеров определяется следующими основными причинами [1, 2]:

1. Спектр света, отражённого объектом при освещении комбинацией монохроматических лучей, отличается от спектра света, отражённого объектом при освещении белым светом.

2. Вследствие несовершенства голографического фотоматериала и химико-фотографической обработки монохромный луч записывается с искажением цвета в виде размытого спектра.

3. Регулируя комбинацию монохроматических лучей можно добиться достаточно точного воспроизведения только одного составного цвета.

В данной работе обоснована одна из возможных схем процесса получения полноцветного объёмного изображения, лишённая указанных недостатков традиционного метода изготовления цветных голограмм. Процесс состоит из следующих этапов:

1. Изготовление цветной липпмановской фотографии объекта.

2. Оптическое сканирование объекта.

3. Экспонирование полноцветной голограммы.

4. Химико-фотографическая обработка.

5. Наблюдение голограммы.

Липпмановская фотография представляет собой набор плоских голографических зеркал, параллельных поверхности фотопластинки, селективно отражающих естественный цвет изображения находящегося на данном участке фотографии (рисунк 1).

Обычное металлическое зеркало при освещении светом создаёт непосредственно у поверхности зеркала специфичную интерференционную картину, образуемую падающими и отражёнными частями фотонов.

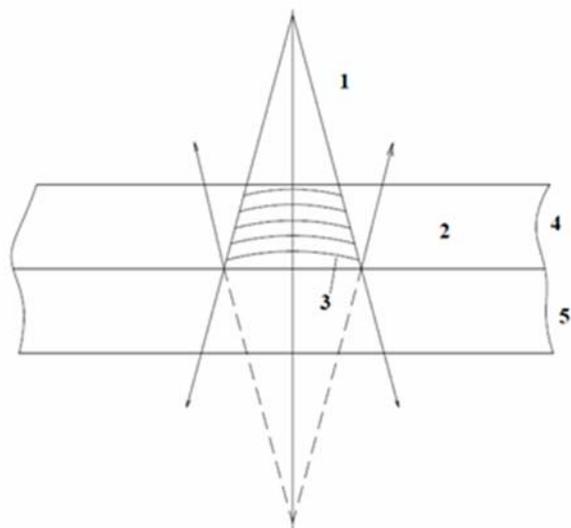
Этот эффект используется для получения цветных интерференционных зеркал в фотослое липпмановской фотографии.

Липпмановская фотография в рассматриваемом процессе используется в качестве отражательного фильтра, являющегося источником полноцветного изображения объекта при освещении белым светом. Селективный голографический фильтр, находящийся в фотослое липпмановской фотографии пропускает весь спектр белого света, кроме селективно отражаемых фотонов с длиной волны данного участка фильтра. Аналогично металлическому зеркалу у поверхности голографического зеркала образуется интерференционный слой, создаваемый встречными частями цугов селективно отражённых фотонов. Если поток фотонов падает нормально к поверхности селективного зеркала, узлы и пучности интерференционной картины образуют плоскости параллельные поверхности фотослоя, расстояние между которыми равно половине длины волны фотона. При падении параллельного потока фотонов под углом меньшим прямого расстояние между параллельными плоскостями уменьшается. Радиально расходящийся поток фотонов образует интерференционную картину в виде системы гиперболоидов, обращённых выпуклостью в сторону источника излучения, у радиально сходящегося потока гиперболоиды обращены выпуклостью от источника.

Необходимую информацию о положении точек поверхности объекта можно получить, сканируя поверхность объекта. В результате сканирования объекта необходимо определить расстояние от сканируемого пикселя поверхности объекта до поверхности фотослоя и зафиксировать координаты пикселя. Полученная информация об объёме объекта поступает в ЭВМ, которая рассчитывает программу, управляет радиусом пучка белого света и вводит информацию об объёме



1 — отражает синий цвет, 2 — отражает красный цвет  
Рис. 1. Схема плоских зеркал в фотослое липпмановской фотографии



1 — падающий пучок белого света; 2 — отражённый цветной пучок; 3 — регистрируемая зона интерференции; 4 — фотослой; 5 — селективное плоское зеркало участка липмановской фотографии

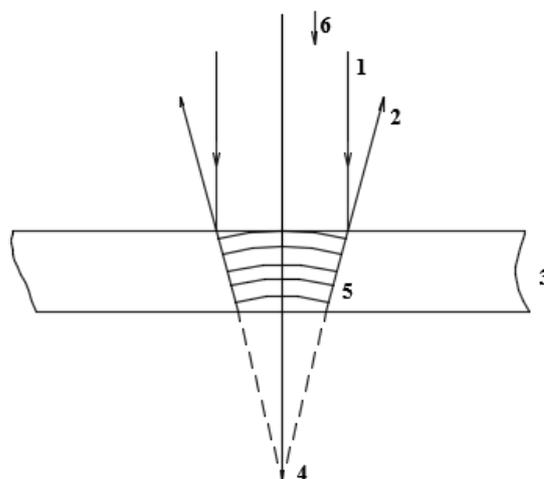
Рис. 2. Схема образования интерференционной картины расходящимся потоком фотонов, отражённым от плоского голографического зеркала

объекта в поверхностный интерференционный слой липмановской фотографии.

Руководящая идея конструирования рассматриваемого процесса заключается в том, чтобы в поверхностном интерференционном слое фотографии Липмана поместить информацию об объёме изображаемого объекта. С этой целью можно использовать расходящийся пучок белого света, сформированного с помощью микрообъектива. В этом случае плоское селективное зеркало липмановской фотографии отражает расходящийся пучок соответствующего цвета. Падающая и отражённая части цуга фотона находятся под некоторым углом, увеличивающимся при удалении от центра радиального пучка, где он равен нулю. Поверхности интерференции в поверхностной зоне имеют выпуклую форму относительно поверхности зеркала (рисунок 2). Регулируя радиус падающего пучка, можно регулировать форму интерференционных поверхностей, и тем самым вводить информацию о расположении соответствующей точки изображения объекта. Положением микрообъектива управляет компьютерная программа экспонирования.

При экспонировании голографический фотоматериал накладывается фотослоем на фотослой липмановской фотографии, как показано на рисунке 2, и в таком положении производится экспонирование полноцветной голограммы. Процесс экспонирования проводят методом фотонабора. Интерференционная картина фиксируется в светочувствительном слое голографического фотоматериала.

С целью обеспечения высокого качества полноцветного объёмного изображения необходимо соблюсти особые требования к фотоматериалу, режимам



1 — восстанавливающий пучок белого света; 2 — цветной пучок восстановленного изображения; 3 — голограмма; 4 — точка изображения; 5 — семейство гиперболических зеркал голограммы; 6 — направление наблюдения

Рис. 3. Схема образования точки голографического изображения при отражении от гиперболических зеркал пикселя голограммы

экспонирования и химико-фотографической обработки:

1. Для изготовления липмановской фотографии и полноцветной голограммы необходим панхроматический голографический фотоматериал светочувствительный во всём видимом диапазоне света, который в настоящее время не производится.

2. Материал должен обладать максимальной дифракционной эффективностью во всём видимом диапазоне света, что позволит сократить до минимума эффект искажения цвета вследствие размытия спектра.

3. Материал для изготовления полноцветной голограммы должен обладать свойством, обеспечивающим надёжную регистрацию интерференционной картины при одновременной равномерной засветке фотослоя светом, не участвующим в образовании интерференции. Таким замечательным свойством обладают фотослой на основе бихромированной желатины [3].

4. В процессе экспонирования липмановской фотографии необходимо обеспечить получение селективных голографических зеркал параллельных поверхности фотослоя по всему полю фотографии, что может быть достигнуто путём применения длиннофокусного объектива, линзового конденсора или параболического зеркала. Выполнение этого требования позволит избежать изменения цвета изображения вне центра фотографии.

5. В процессе химико-фотографической обработки фотографии и голограммы необходимо обеспечить нулевую усадку фотослоя, чтобы исключить изменение цвета изображения поверхностей объекта.

Полагаем, что предложенный процесс может обеспечить изготовление цветной объёмной голограммы с полным естественным воспроизведением цвета объекта. Поскольку в рассматриваемом способе

получения цветного объёмного изображения не используется лазерное излучение, способ можно отнести к объёмной фотографии.

Для практического осуществления процесса изготовления полноцветных голограмм необходимо решить следующие задачи:

— разработать технологию изготовления панхроматических голографических фотопластинок;

— разработать и изготовить сканирующий оптический прибор, определяющий расстояние между поверхностью фотослоя и поверхностью объекта относящейся к сканируемому пикселю;

— разработать оптическую систему и фотонаборный механизм экспонирования, управляемый цифровой программой;

— разработать компьютерную программу для процессов сканирования и экспонирования.

#### Список источников

- [1] Шварцвальд, А. И. Введение в иконику изобразительных голограмм. Воспроизведение цвета / А. И. Шварцвальд // Тезисы доклада на 13-ой международной конференции «ГОЛОЭКСПО 2016» — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. — С. 413.
- [2] Шварцвальд, А. И. Введение в иконику изобразительных голограмм. Воспроизведение цвета / А. И. Шварцвальд // Мир техники кино. — 2016. — Том. 10. — № 3. — С. 27–30.
- [3] Малов, А. Н. Нанотехнологические проблемы цветной голографии / А. Н. Малов, А. Н. Онацкий, А. И. Шварцвальд // Голография: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии. Материалы XXVI школы по когерентной оптике и голографии — Иркутск: Папирус, 2008. — С. 186–195.
- [6] Канатников, А. Н. Аналитическая геометрия: учеб. для вузов / А. Н. Канатников, А. П. Крищенко; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. — 6-е изд. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 387 с.

## Justification the possibility of manufacturing a full-color visual holograms using the interference color photographs of Lippmann

*A. I. Shvartzvald*

The University of Pereslavl named after A. K. Aylamazyan, Pereslavl-Zalessky, Russia

Manufacture of full-color hologram traditional method with color lasers is fundamentally impossible.

This paper substantiates one of possible schemes for obtaining full-color volume images, devoid of weaknesses of the traditional method of manufacturing process. Discussed full-color volume holograms using color interference as Lippmann photography selective radiant source, filter full-color images and a layer that is generated near the surface fotolayer, yes selective reflection photons when illuminated with white light. The author believes that the proposed process can ensure the production of colored volumetric hologram with full natural color reproduction of an object. Because in this way the laser radiation is not used, it can be attributed to the field of volumetric photographs.

**Keywords:** Holography, Interference photography, Full-color volume hologram, Volume Scan of the object, Phototypesetters exposure holograms, Volume photography.

### 5.11. Голографическая запись в тонких слоях полифторированных халконов и их оптические свойства

С. В. Дервяшкин<sup>1,2</sup>, Е. А. Соболева<sup>1</sup>, В. В. Шелковников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский институт органической химии имени Н. Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Цель работы направлена на изучение оптических, спектральных свойств полифторированных халконов в слоях толщиной порядка 3 мкм. Для исследуемых слоев были подобраны режимы термической обработки, а также жидкостного травления; записаны пропускающие голограммы и рассчитаны основные их параметры: дифракционная эффективность и угловая селективность.

**Ключевые слова:** оптика, голография, пропускающие голограммы, тонкие голограммы, фторированный халкон, фоторезист.

В последнее время все чаще становятся популярными технологии создания голографических оптических элементов (ГОЭ) [1–4]. Большинство исследований в области материалов для ГОЭ сопряжены с развитием фотополимерных материалов [5].

Типичные толщины фотополимерных слоев составляют 30–40 мкм, что обеспечивает ширину угловой селективности (УС) на полувысоте не более нескольких градусов, как показано в выражении (1) [1]. Это означает, что диапазон углов падения света на ГОЭ при котором тот способен эффективно функционировать при соблюдении условия Брэгга, очень мал. Вместе с тем существует ряд задач, где необходимо обеспечить работоспособность ГОЭ в большем диапазоне углов падения света, например, для концентрирования солнечной энергии на фотогальванических элементах солнечных батарей [2–3] для создания оптических голографических прицелов [4]. Этим требованиям отвечают рельефно — фазовые дифракционные решетки в тонких фотополимерных материалах толщиной до 10 мкм. При создании ГОЭ подобного типа к материалу оптического фотополимерного элемента возникают требования высокой термической устойчивости и малой усадки голограммы в конечном элементе.

$$\delta_a = \frac{\xi_e \lambda_0}{2\pi n T \sin \Theta_0}. \quad (1)$$

Увеличение угла обзора прицельного знака или углов падения солнечного света на концентрирующий элемент можно добиться путем увеличения ширины угловой селективности дифракционной решетки за счет уменьшения толщины фотополимерного слоя.

Для обеспечения высокой дифракционной эффективности тонких фотополимерных голограмм, требуется формировать решетки с высоким контрастом интерференционных полос, что может быть достигнуто посредством процесса мокрой обработки. В рамках решения данной задачи потенциально перспективными являются фотополимерные материалы, обладающие фоторезистивными свойствами. В этой связи, представляет интерес поиск фоторезиста, обладающего способностью образовывать термически устойчивую пленку, формировать при экспозиции УФ светом жесткую дифракционную микроструктуру, иметь высокий

показатель преломления. Среди известных классов фоторезистов можно выделить халконы или бензиденацетофеноны, способные к образованию жестких сшитых структур по реакции  $[2\pi + 2\pi]$  циклоприсоединения двойной углерод-углеродной связи при  $\alpha, \beta$ -ненасыщенном карбонильном центре при облучении УФ-светом. Халконы являются негативными фоторезистами с хорошей термостабильностью, растворимостью несшитой формы в органических растворителях и стойкостью к растворителям для сшитой формы [6]. Введение в структуру халконов атомов фтора вместо атомов водорода с одной стороны может повысить растворимость исходной формы халкона и с другой стороны повысить резистивность к растворителям и термическим обработкам фотоциклизованной формы. Ранее были синтезированы различные производные полифторированных халконов [7–8]. Однако их свойства и пригодность для записи дифракционных структур в тонких пленках не исследованы.

Объектом исследования является голографический фотополимерный материал на основе полифторированного халкона, структурная формула которого приведена на рисунке 1.

В рамках данной работы были определены значения показателя преломления полимеризованных фто-

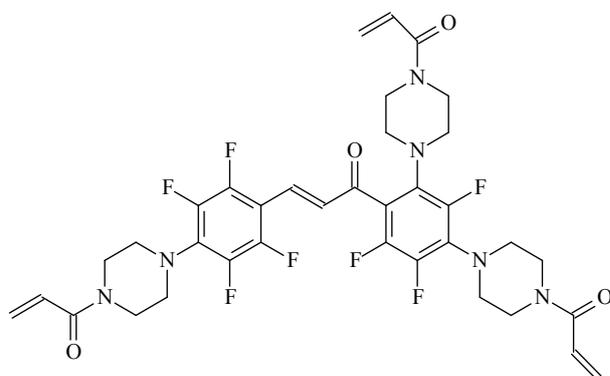


Рис. 1. Структурная формула исследуемого халкона 3-(4-(4-акрилоилпиперазин-1-ил)-2,3,5,6-тетрафторфенил)-1-(2,4-бис(4-акрилоилпиперазин-1-ил)-2,5,6-трифторфенил)-проп-2-ен-1-он (B229B)

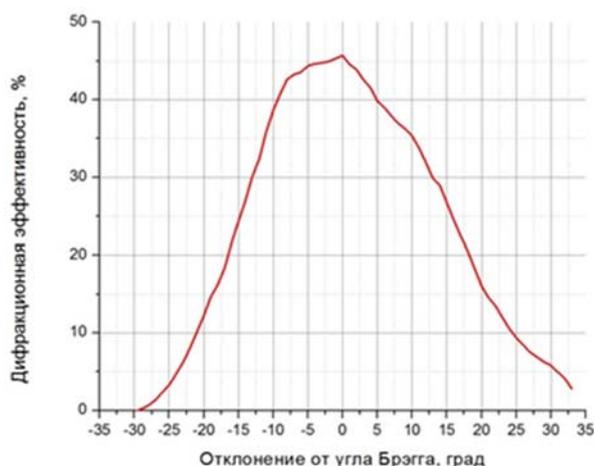


Рис. 2. График зависимости дифракционной эффективности от отклонения от угла Брэгга тонкой голограммы

рированных халконов, изучены спектральные характеристики; проведен подбор оптимального растворителя для проявления голографической решетки.

В результате, процесс получения качественных пропускающих голограмм на основе полифторированных халконов состоит из следующих этапов:

- 1) приготовление фотополимерной композиции, высушивание;
- 2) предварительный нагрев образца;
- 3) запись голограммы;
- 4) проявление голограммы путем жидкостного травления.

В полученных тонких слоях была исследована кинетика голографической записи, а также получена кривая зависимости дифракционной эффективности от отклонения от угла Брэгга, представленная на рисунке 2.

Несимметричность кривой, представленной на рисунке 2 объясняется неравномерной усадкой материала в ходе травления. Таким образом, голограммы, полученные на тонких слоях полифторированных халконов, обладают значениями дифракционной эффективности до 45 %, и значениями угловой селективности до 54°.

#### Список источников

- [1] Лушников, Д. С. Расчет и исследование угловой и спектральной селективностей для полнопараллаксных голограммных стереограмм / Д. С. Лушников, А. Ю. Жердев, В. В. Маркин, С. Б. Одинокоев, А. В. Смирнов / Компьютерная оптика. — 2016. — Том. 40. — № 6. — С. 802–809.
- [2] Christo, G. Stojanoff Engineering applications of HOEs manufactured with enhanced performance DCG films / G. Christo // Practical Holography XX: Materials and Applications. — 2006.
- [3] Akbari, H. Design and Study of Acrylamide-based Photopolymer Holographic Optical Elements for Solar Application / H. Akbari, I. Naydenova, M. Kennedy, J. Doran, S. Martin / 2-nd International Conference on Sustainable Energy Storage. — 2013.
- [4] Патент № 95 140 РФ, G 02 В 5/23. Голографический кол-лиматорный прицел и устройство записи компенсационного голограммного оптического элемента / С. Б. Одинокоев, М. С. Ковалёв и др. — Оpubл. 10.06.2010, Бюл. № 16.
- [5] Jurbergs, D. New recording materials for the holographic industry / D. Jurbergs // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. — 2010. — Vol. 4. — P. 73–77.
- [6] Selvam, P. Synthesis and characterization of new photoresponsive acrylamide polymers having pedant chalcone moieties / P. Selvam, S. Nanjundan / Reactive & Functional Polymers. — 2005. — Vol 62. — № 2. — P. 179–193.
- [7] Шмуйлович, К. С. Синтез акрилоильных производных полифторхалконов / К. С. Шмуйлович, Н. А. Орлова, В. В. Шелковников / Известия академии наук. Серия химическая. — 2011. — № 8. — С. 1750.
- [8] Бородина, Е. А. Синтез (N-акрилоил) пиперазинозамещенных фторхалконов / Е. А. Бородина, Н. А. Орлова, В. В. Шелковников / Известия академии наук. Серия химическая. — 2013. — № 10. — С. 2226.

## Holographic recording in thin layers of polyfluorinated chalcones and their optical properties

S.V. Derevyashkin<sup>1,2</sup>, E.A. Soboleva<sup>1</sup>, V.V. Shelkovnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> N. N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The aim of this work is to study the optical, spectral properties of polyfluorinated chalcones in layers about 3 μm thicknesses. For the layers studied, the heat and wet etching processing conditions were chosen; Transmission holograms were recorded and their main parameters, diffraction efficiency and angular selectivity, were calculated.

**Keywords:** Optics, Holography, Transmission holograms, Thin holograms, Fluorinated chalcone, Photoresist.

6. Голографическая интерферометрия,  
голографическая память  
и оптико-голографическая  
обработка информации



## 6.1. Интерферометрический контроль юстировки оптической системы с эксцентрично расположенной асферической линзой

*Р. К. Насыров<sup>1</sup>, А. Г. Полещук<sup>1</sup>, М. Н. Сокольский<sup>2</sup>, В. П. Трегуб<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> АО «ЛОМО», Санкт-Петербург, Россия

Предложен интерферометрический метод контроля качества сборки трех-линзового блока со смещенной асферической линзой нецентрированной девяти-компонентной оптической системы авиационного наשלемного широкоугольного дисплейного коллиматора. Показано, что предложенный метод юстировки позволяет выставить оптические компоненты с погрешностью единицы микрометров, в том числе эксцентрично расположенную асферическую линзу. Метод является бесконтактным и позволяет контролировать положение линз внутри корпуса прибора.

**Ключевые слова:** Дифракционная оптика, Интерферометр, Оптический контроль.

### Введение

В настоящее время актуальной проблемой оптической промышленности является сборка и юстировка сложных многокомпонентных линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых систем, в том числе с асферическими и децентрированными поверхностями. Причем для оптических систем, используемых в астрономии и аэрокосмической отрасли, необходимо обеспечить очень высокое качество сборки.

Для сборки сложных оптических систем широко используются лазерные трекары и координатно-измерительные машины (КИМ), который могут измерять положение механических или оптических элементов в трех измерениях с погрешностью до нескольких микрометров. Однако механическая компоновка системы часто ограничивает доступ сенсора КИМ или блокирует линию визирования лазерного трекара. Кроме того, оптические поверхности, особенно с покрытиями, не должны иметь механических контактов с сенсорами.

Неконтактные методы юстировки и центрировки линз при сборке обычных объективов хорошо известны и широко применяются в практике оптического приборостроения [1]. Центрировку линз, как правило, осуществляют по наблюдению автоколлимационных бликов от контролируемой поверхности при ее вращении. Используемые для этих целей автоколлиматоры и юстировочные телескопы имеют достаточно малые габариты, высокую точность и позволяют проводить контроль сборки в реальном времени. Однако погрешность этих методов растет с увеличением расстояния до контролируемой поверхности, сама поверхность должна иметь возможность вращения, а юстировка возможна, как правило, только вдоль оптической оси, т. е. данный метод не применим для юстировки эксцентрично расположенных поверхностей. Так же существенным недостатком автоколлимационного метода является отсутствие возможности контроля величины воздушных промежутков между линзами.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ), которые позволяют формировать практически любую форму волнового фронта и/или фокусировать свет в заданную область пространства, нашли широкое применение в устройствах юстировки оптических систем с использованием телескопов [2], интерферометров [3]

или видеокамер. Базовым принципом их применения является возможность размещения на одной оптической подложке нескольких дифракционных структур, пространственно разнесенных или перекрывающихся [4], каждая из которых преобразует световой поток по заданному закону. Причем взаимное положение этих структур (например, их центров) выдерживается при изготовлении с погрешностью менее 0,1 мкм. Для контроля поверхности крупногабаритных асферических зеркал используются ДОЭ состоящие из главной структуры, окруженной несколькими вспомогательными фокусирующими дифракционными элементами. Вспомогательные элементы обычно формируют вне световой апертуры зеркала световые маркеры (например, кресты) в строго заданных позициях в которых установлены видеокамеры. Однако, этот метод юстировки только облегчает первоначальную установку зеркала в заданное положение и не позволяет контролировать его смещение с высокой точностью. Главная структура ДОЭ, являющаяся корректором волнового фронта, предназначена для контроля формы асферической поверхности интерференционным методом. При этом, взаимное положение ДОЭ и контролируемой поверхности в пространстве должно быть выдержано с погрешностью в единицы и даже доли микрометра. В противном случае интерферометр будет регистрировать конечное число полос. Этот же принцип можно распространить и на метод юстировки: если поверхность выставлена правильно, то на интерферограмме наблюдается поле равномерной освещенности («бесконечная» полоса). При смещении поверхности, наблюдается интерферограмма с конечным числом полос. Перемещая в пространстве контролируемую поверхность так, чтобы минимизировать количество полос на интерферограмме, можно установить ее в правильное (расчетное) положение с погрешностью в доли микрометра. Этот подход может быть применен и к юстировке многокомпонентной оптической системы [5] с использованием многозонального ДОЭ, каждая зона которого используется для «привязки» к соответствующей поверхности. Однако при этом часто возникает проблема, что такие зоны перекрываются друг с другом. Это ведет к ограничению числа оптических элементов, которые могут быть выставлены при помощи одного ДОЭ. Одним из путей решения данной

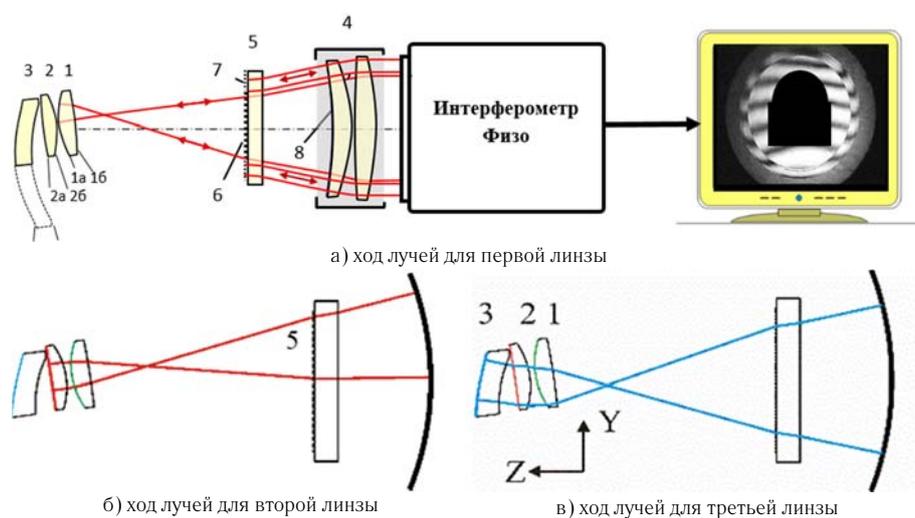


Рис. 1. Схема контроля юстировки трехлинзовой оптической системы

Таблица 1. Параметры трехлинзового блока

Поверхность	Радиус $R$ , мм	Коническая константа	Толщина, мм	Стекло	Смещение $Y$ , мм
1б	307		6	СТК18	
1а	30		2		
2б	30		5	К8	
2а	946		7		
3б	43		8	К8	15
3а	25	-6,5			

проблемы является разбиение сложной оптической системы на блоки, к каждому из которых для юстировки рассчитывается и изготавливается соответствующий ДОЭ. Далее, может быть изготовлен ДОЭ, который обеспечивает взаимную юстировку всех блоков оптической системы.

В настоящей работе мы описываем особенности расчета многозонального ДОЭ предназначенного для интерферометрического контроля юстировки одного из блоков сложной оптической системы, состоящего из эксцентрично расположенного сегмента асферической линзы и двух сферических линз, представлены экспериментальные результаты.

### 1. Особенности расчета многозонального ДОЭ

Для того, чтобы отъюстировать с помощью ДОЭ несколько оптических компонентов друг относительно друга, на оптической подложке изготавливается несколько дифракционных зон, каждая из которых используется для «привязки» к соответствующей юстируемой поверхности. Однако при расчете таких зон имеется ряд ограничений. Так, если структура ДОЭ «привязана» к сферической поверхности юстируемой линзы, это может привести к ее неправильной установке, т. к. минимум интерференционных полос может возникнуть и при наклоненной линзе, если этот наклон скомпенсирован боковым смещением. Поэтому, при расчете системы линз со сферическими поверхностями необходимо рассчитывать ДОЭ так, чтобы измерительный пучок от интерферометра проходил сквозь

линзу и отражался от ее задней поверхности. В этом случае, измерительный пучок не будет сферическим, что позволит выставить линзу однозначно.

В качестве примера в настоящей работе рассмотрен контроль трехлинзового блока нецентрированной девяти компонентной оптической системы авиационного наשלемого широкоугольного дисплейного коллиматора [6]. Блок состоит из двух сферических линз 1, 2 и одного эксцентрично расположенного сегмента асферической линзы 3, примерные параметры схемы приведены в таблице 1.

Настройка линзового блока контролировалась с помощью интерферометра типа Физо. На рисунке 1а показан ход световых лучей при контроле положения линзы 1. На выходе интерферометра установлены эталонный объектив 4 и многозональный ДОЭ 5. Линзовый блок установлен под углом к оптической оси интерферометра. ДОЭ состоит из основной 6 и вспомогательной 7 зон. Основная зона 6 состоит из трех дифракционных структур (рисунок 2а) для юстировки каждой из линз. Вспомогательная кольцевая зона 7, отражающая свет назад, служит для установки ДОЭ относительно интерферометра. Ход лучей после прохождения ДОЭ рассчитывается таким образом, чтобы они падали на задние поверхности линз 1а, 2а и 3а по нормали. Таким образом при правильной установке линз обеспечивается автоколлимационный ход лучей и интерферометр будет регистрировать «бесконечную» полосу при интерференции света, отраженного от поверхностей 1а,

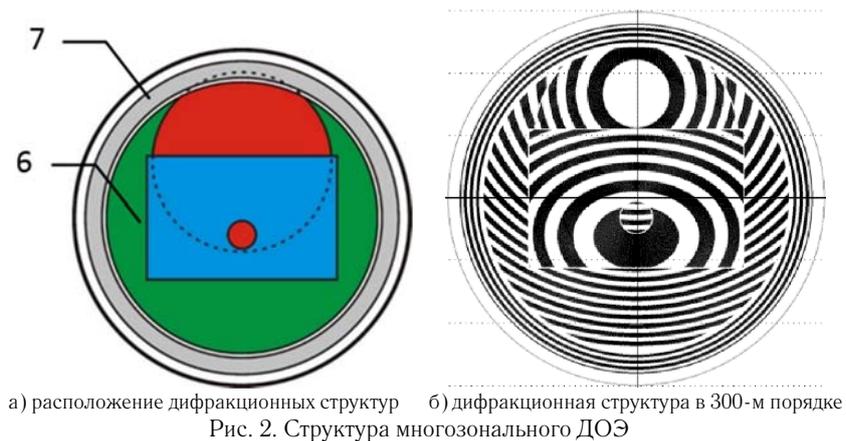


Рис. 2. Структура многозонального ДОЭ

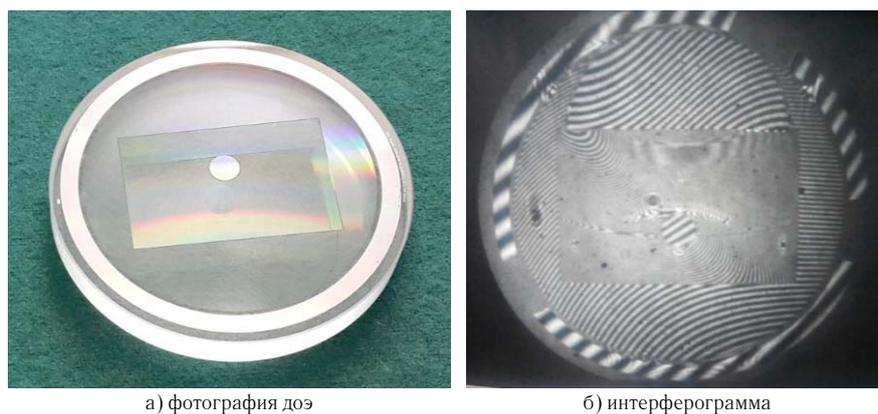


Рис. 3. Изготовленный ДОЭ

2а и 3а и от опорной поверхности 8 эталонного объектива. На рисунке 1б и 1в схематично показан ход световых лучей для юстировки линз 2 и 3.

Форма дифракционных структур была выбрана таким образом, чтобы обеспечить полную засветку контролируемой поверхности линзы. При этом, дифракционные структуры перекрывались между собой. Так как дифракционные структуры нельзя изготовить одну поверх другой, приходилось делать выбор, какую структуру обрезать. Был выбран компромиссный вариант, структура для контроля поверхности 3а была сделана почти полностью, так как эта поверхность асферическая и самая дальняя, а потому наиболее важная для юстировки. При этом, структура для контроля поверхности 2а оказалась урезана наполовину, чтобы это немного скомпенсировать был добавлен участок структуры в виде маленького круга в центре прямоугольной структуры (рисунок 2а). На рисунке 2б показан расчетный вид дифракционных структур в 300 порядке дифракции.

## 2. Расчет и изготовление ДОЭ

Оптическая система (рисунок 1) моделировалась в программе Zemax. Фазовая структура ДОЭ рассчитывалась с использованием программы Matlab для длины волны интерферометра 632,8 нм. Оптическая разность хода, компенсируемая ДОЭ, вычислялась методом трассировки лучей в Zemax с использованием DDE протокола. Неудобством этого метода являлось то, что

для каждой дифракционной структуры требовалось создавать отдельный Zemax файл. После этого, рассчитанная фазовая карта линейно интерполировалась и на ее основе вычислялись границы дифракционных зон. Рассчитанная дифракционная микроструктура ДОЭ изготавливалась на полированной плоскопараллельной подложке из плавленого кварца диаметром 60 мм и толщиной 7,5 мм. Плоскостность сторон составляла около  $0,05\lambda$  (P-V). Изготовление ДОЭ проводилось в два этапа. На первом этапе проводилось запись микроструктуры ДОЭ в пленке хрома по лазерной термохимической технологии с использованием разработанной в ИАиЭ СО РАН установки CLWS-300IAE. На втором этапе с помощью реактивного-ионного травления формировалась бинарная фазовая микроструктура ДОЭ. Внешний вид изготовленного ДОЭ показан на рисунке 3а.

Технологическим ограничением для изготовления дифракционной структуры является минимально возможный период 3 мкм для внеосевых бинарных фазовых структур. Соответственно, это приводит к ограничению максимального угла дифракции, который не должен превышать  $\approx 12^\circ$ . Это приводит к ограничению оптических систем, которые могут быть настроены таким методом.

Контроль сборки трехлинзового блока проводился в соответствии со схемой на рисунке 1 с использованием интерферометра ИКД-110 [7] и эталонного

объектива F/1,5. На рисунке 3б приведена интерферограмма трехлинзового блока на этапе юстировки. Видно, что сферические линзы выставлены с достаточно высокой точностью. Внеосевой сегмент асферической линзы установлен с меньшей точностью, однако интерференция наблюдается. Это соответствует смещению в пределах нескольких сотен микрометров либо наклону линзы в пределах десятых долей градуса.

### Заключение

Предложен, промоделирован и экспериментально апробирован интерферометрический метод юстировки многокомпонентных оптических систем на основе многозональных ДОЭ. Показано, что предложенный метод юстировки позволяет выставить оптические

компоненты с погрешностью единицы микрометров, в том числе эксцентрично расположенную асферическую линзу. Метод является бесконтактным и позволяет контролировать положение линзы внутри корпуса прибора. Ограничением данного метода является количество юстируемых компонентов при помощи одного ДОЭ, которое составляет 3–4. Также ограничением является максимальный угол дифракции ( $12\text{--}15^\circ$ ), который обусловлен технологией изготовления фазового рельефа ДОЭ.

### Благодарности

Данная работа поддержана грантом РФФИ № 17-19-01721.

### Список источников

- [1] **Белоглазов, А. А.** Коллимационные и автоколлимационные устройства для контроля центрирования линз / А. А. Белоглазов, А. Н. Орнис // ОМП. — 1972. — № 10. — С. 57–62.
- [2] **Полещук, А. Г.** Совмещение дифракционных и рефракционных компонентов в оптических системах / А. Г. Полещук // Автометрия. — 1985. — № 6. — С. 27–31.
- [3] **Coyle, L. E.** Design and analysis of an alignment procedure using computer-generated holograms / L. E. Coyle, M. B. Dubin, J. H. Burge // Optical Engineering. — 2013. — Vol. 52. — № 8. — P. 2–16.
- [4] **Asfour, J.-M.** Asphere testing with a Fizeau interferometer based on a combined computer-generated hologram / J.-M. Asfour, A. G. Poleshchuk // J. Opt. Soc. Am. A — 2006. — Vol. 23. — № 1. — P. 172–178.
- [5] **Дорошина, Ю. П.** Перспективы применения голограммных элементов для юстировки внеосевых оптических систем / Ю. П. Дорошина, Р. К. Насыров, С. Б. Одинокоев, А. Г. Полещук, Б. Н. Сеник // Контентант. — 2016. — Том 15. — № 3. — С. 28–33.
- [6] **Патент № 2 586 097 РФ.** Нашлемная широкоугольная коллиматорная дисплейная оптическая система / М. В. Воронова, А. М. Савицкий, М. Н. Сокольский, А. А. Строганов, А. И. Эфрос, А. В. Шукалов. — Оpubл. 10.06.2016.
- [7] **Трегуб, В. П.** Универсальный интерферометр ИКД-110 / В. П. Трегуб, И. П. Агурок, М. С. Горелик, И. И. Духопел, Ю. С. Скворцов // ОМП. — 1990. — № 1. — С. 61–63.

## Interferometric control of alignment of the optical system with an eccentrically positioned aspherical lens

*R. K. Nasyrov<sup>1</sup>, A. G. Poleshchuk<sup>1</sup>, M. N. Sokolsky<sup>2</sup>, V. P. Tregub<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> LOMO, Saint-Petersburg, Russia

An interferometric method for alignment of a three-lens unit with a displaced aspherical lens of a non-centered nine-component optical system of an airborne helmet wide-angle display collimator is proposed. It is shown that the proposed method of alignment makes it possible to set optical components with an error of one micron, including eccentric aspherical lens. The method is non-contact and allows to align the position of the lenses inside the body of the device.

**Keywords:** Diffractive optics, Interferometer, Optical measurements.

## 6.2. Анализ выявления общих фрагментов в последовательности образов наложенными объемными голограммами Фурье: феномен когнитивного насыщения

А. В. Павлов

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Дан уточненный анализ решения методом наложенных голограмм Фурье задачи индуктивного обобщения как выявления общих фрагментов в наборе образов. Для исключения иных, кроме частоты появления в наборе, критериев отнесения фрагмента к общим или индивидуальным, образы описаны реализациями однородного случайного поля. Дана оценка эффективности выявления, для объемных голограмм дана её зависимость от числа голограмм, информационной емкости образов и фрагментов. Показан феномен когнитивного насыщения уровень которого зависит от информационной емкости фрагментов образов. Теоретические выводы подтверждены результатами численных экспериментов.

**Ключевые слова:** Голография Фурье, Наложённые голограммы, Мультиплексная голограмма, Объемная голограмма, Голографическая регистрирующая среда, Голографическая память, Корреляция, Индуктивное обобщение, Индуктивное порождение понятий, Когнитивное насыщение.

### Введение

Метод наложенных голограмм (НГ) широко применяется при создании систем голографической памяти [1] и обработки информации, включая анализ временных последовательностей [2, 3]. В плане поиска закономерностей в череде событий и выявления причинно-следственных связей актуальна задача выявления общих, т. е. коррелированных, фрагментов в последовательности образов.

Подход к решению этой задачи методом НГ Фурье предложен и промоделирован в [4]. В статье [5], в развитие подхода [4], дан анализ зависимости оценки эффективности выявления общих фрагментов от оценки информационной емкости фрагментов образов и условий записи голограмм при описании образов как реализаций однородных случайных полей. Вместе с тем, анализ в [5] дан только для условия полной ортогональности различающихся фрагментов опорных образов в предположении утраты свойства инвариантности преобразования Фурье к сдвигу. Теоретические выводы были иллюстрированы результатами численных экспериментов на примерах обработки реализаций стационарных случайных процессов.

Однако реальные изображения характеризуются не ортогональностью, но частичной коррелированностью. Методы искусственной ортогонализации обрабатываемых образов неприменимы в данной задаче, поскольку ортогонализация разрушит коррелированность не только подлежащих подавлению различающихся, но и искомых общих фрагментов. Поэтому актуален анализ зависимости эффективности выявления общих фрагментов образов от числа НГ, условий их записи и характеристик голографических регистрирующих сред (ГРС) при частичной коррелированности различающихся фрагментов анализируемых образов.

В докладе, в развитие [4, 5], дан уточненный анализ зависимости эффективности выявления общих (коррелированных) фрагментов методом НГ Фурье по схеме совместного преобразования. Дана зависимость оценки эффективности выявления от числа объемных НГ и информационных характеристик образов, определяемых, в том числе, свойствами объемных ГРС и

условиями записи голограмм. Теоретические выводы подтверждены результатами численных экспериментов.

В докладе термин «образ» использован как синоним понятий «изображение» и «поле комплексных амплитуд». Термин «последовательность» (или набор) подразумевает частичную коррелированность образующих её образов, как минимум — соседних. Формулировка задачи в терминах коррелированности важна в плане соотнесения анализируемого метода с общей задачей индуктивного обобщения, поскольку предполагает отсутствие иных, кроме частоты появления, априорных критериев отнесения фрагментов образов к общим для всего набора или различающимся (частным). Такая постановка усложняет задачу, так как исключает из рассмотрения методы индукции, основанные на отличии иных характеристик фрагментов.

### Модель

Рассматривается  $4f$ -схема голографии Фурье с записью НГ методом совместного преобразования, приведенная на рисунке 1. Для упрощения выражений рассмотрение, где это возможно без ущерба для смысла, проведем при описании образов и, соответственно, голограмм как функций только одной переменной.

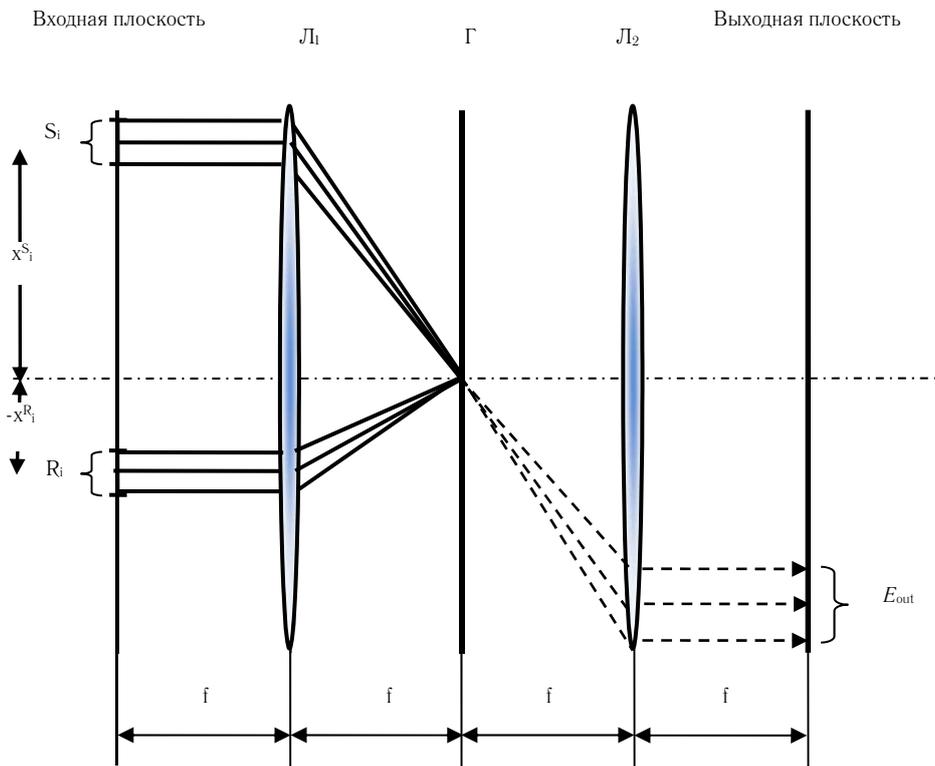
В схеме на рисунке 1 записывается мультиплексная голограмма Фурье

$$H(\mathbf{v}_x) = \sum_{k=1}^n H_k(\mathbf{v}_x), \quad (1)$$

образованная в предположении записи в пределах линейного участка динамического диапазона экспозиционной характеристики ГРС наложением  $n$  НГ пар образов  $S_k(x) \leftrightarrow R_k(x)$

$$H_k(\mathbf{v}_x) = F(S_k(x))F^*(R_k(x))\exp(-j\omega(x_k^{(R)} + x_k^{(S)})), \quad (2)$$

где  $F$  — символ преобразования Фурье, астериск — символ комплексного сопряжения,  $\mathbf{v}_x$  — пространственная частота,  $\omega_x = 2\pi\mathbf{v}_x$  — круговая пространственная частота,  $x_k^{(R)}$  и  $x_k^{(S)}$  — координаты, описывающие локализацию соответствующих образов во входной плоскости относительно главной оптической



$R_i, S_i$  — пара записываемых на одной голограмме  $\Gamma$  образов,  $x_k^{(R)}, x_k^{(S)}$  — их координаты относительно главной оптической оси,  $L_1, L_2$  — первая и вторая фурье-преобразующие линзы с фокусными расстояниями  $f$ . Пунктирными линиями показан ход лучей, восстанавливающих в выходной плоскости поле  $E_{out}$  при предъявлении во входной плоскости образа  $R_i$ .

Рис. 1.  $4f$ -схема голографии Фурье

оси,  $j$  — мнимая единица. Условимся, что  $S_k(x)$  — сигнальный образ, а  $R_k(x)$  — опорный, их наборы:  $\{S_k\}_{k=1}^n$  и  $\{R_k\}_{k=1}^n$ , соответственно. Представим образы суммами их фрагментов: общих, то есть коррелированных, с верхним индексом  $c$  и различающихся, играющих в задаче роль мешающего фона, с верхним индексом  $u$ .

$$\begin{cases} S_k(x) = S_k^c(x) + S_k^u(x) \\ R_k(x) = R_k^c(x) + R_k^u(x) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} S_k^c(x) = m^{(S)} S_k(x) & R_k^c(x) = m^{(R)} R_k(x) \\ S_k^u(x) = (1 - m^{(S)}) S_k(x) & R_k^u(x) = (1 - m^{(R)}) R_k(x) \end{cases}$$

где  $m$  с соответствующими верхними индексами — удельные веса общих фрагментов образов.

В [5] показано, что для решения задачи должно быть выполнено условие постоянства расстояния между сигнальными и опорными образами при записи всех НГ

$$\forall k, l \in [0, n]: x_k^R - x_l^R = x_k^S - x_l^S.$$

Для объемных голограммам это условие есть требование на постоянство локализации во входной плоскости для всех образов обрабатываемых последовательностей  $\{S_k\}_{k=1}^n$  и  $\{R_k\}_{k=1}^n$ .

При предъявлении во входной плоскости схемы на рисунке 1 с голограммой (1)  $k$ -ого опорного образа

$R_k(x)$ , в выходной плоскости схемы на рисунке 1 формируется поле комплексных амплитуд:

$$\begin{aligned} E_{out}(x) &= F[F(R_k(x))H(v_x)] = \\ &= S_k(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] + \\ &+ \sum_{k \neq l} S_l(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_l(x)] + \\ &+ [1 + (m^{(R)})^2(n-1)] \{ S_k^c(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] + \\ &+ S_k^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] + \\ &+ (m^{(R)})^2 \sum_{k \neq l} S_l^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] + \\ &+ \sum_{k \neq l} S_l(x + x_k^{(S)}) * [R_j^u(x) \otimes R_l^u(x)] + \\ &+ \sum_{k \neq l} S_l(x + x_k^{(S)}) * [R_j^c(x) \otimes R_l^u(x)] + \\ &+ \sum_{k \neq l} S_l(x + x_k^{(S)}) * [R_j^u(x) \otimes R_l^c(x)] \end{aligned} \quad (4)$$

где  $*$  и  $\otimes$  — символы операций свертки и корреляции, соответственно, члены в квадратных скобках в итоговом выражении, описывающие авто- и кросс-корреляционные функции опорных образов и фрагментов, имеют смысл импульсных откликов системы. В выражении (4), сравнительно с (12) из статьи [5], полностью учтены все кросс-корреляционные члены.

Первое слагаемое в итоговом выражении (4) описывает требуемое для решения задачи поле  $E_{out}^c(x)$  — восстановленный мультиплексной голограммой (1) общий, т. е. полностью коррелированный, фрагмент всех

сигнальных образов  $\{S_k\}_{k=1}^n$ . Второе слагаемое — постоянная помеха, не зависящая от числа НГ. В [5] показано, что при полной коррелированности опорных образов вклад третьего слагаемого, также являющегося помехой и зависящего от числа НГ, уменьшает помеху, позволяя, тем самым, выявить коррелированный фрагмент.

Механизм этого выявления основан на свойстве дисперсии суммы случайных полей [6, 7], а сама дисперсия здесь — интегральная оценка модулированности образов. Оценка эффективности выявления коррелированного фрагмента  $E_{\text{out}}^c(x)$  на фоне играющего роль фона или помехи поля, которое обозначим  $E_{\text{out}}^u(x)$ , может быть дана через отношение их дисперсий  $D_{\text{out}}^c(x)$  и  $D_{\text{out}}^u(x)$ : рост этого отношения с ростом  $n$  означает уменьшение модулированности поля  $E_{\text{out}}^u(x)$ , сравнительно с модулированностью  $E_{\text{out}}^c(x)$ . Иными словами, с ростом  $n$  фон  $E_{\text{out}}^u(x)$  становится все более ровным (серым), а модулированность  $E_{\text{out}}^c(x)$  сохраняется.

В [5] в качестве первого приближения были учтены только первые три слагаемых в (4). Ниже учтем все слагаемые и произвольные значения коэффициента взаимной корреляции различающихся фрагментов опорных образов. Для этого необходимо учесть как свойства голограммы (1), в плане сохранения или не сохранения свойства инвариантности преобразования Фурье к сдвигу, так и информационные характеристики образов.

## 2. Оценка эффективности выявления

### 2.1. Влияние свойства объемности голограммы

Каждое из слагаемых, входящее в выражение для восстановленного поля (4), есть свертка с импульсными откликами: функциями автокорреляции (АКФ) опорных образов  $[R_k(x) \otimes R_k(x)]$  для первых трех слагаемых, их различающихся фрагментов  $[R_k^u \otimes R_l^u(x)]$  для четвертого или кросс-корреляции (ВКФ)  $[R_k^c \otimes R_l^u(x)]$  для пятого и шестого. На вклад компонент поля (4)  $E_{\text{out}}^c(x)$  и  $E_{\text{out}}^u(x)$  непосредственно влияет вид членов в квадратных скобках, входящих в четвертое, пятое и шестое слагаемые, а именно — могут ли эти члены могут быть представлены унимодальными функциями или только мультимодальными. Правомочность или, наоборот, неправомочность такого представления определяется сохранением или несохранением свойства инвариантности преобразования Фурье к сдвигу в схеме на рисунке 1 вследствие использования объемных или тонких ГРС, соответственно:

— если свойство сдвиговой инвариантности не сохраняется, то члены в квадратных скобках суть унимодальные функции и учету подлежат только значение

функции, соответствующее началу координат в пространстве корреляций;

— если свойство сдвиговой инвариантности сохраняется, то члены в квадратных скобках как кросс-корреляционные функции есть функции мультимодальные и учету подлежат все корреляционные максимумы — как глобальный, так и боковые.

Поскольку максимальная плотность записи и хранения информации достигается при использовании объемных голограмм, то далее рассмотрим именно этот вариант.

### 2.2. Оценка эффективности выявления для объемной голограммы

Если ГРС объемная, то в силу несохранения свойства инвариантности преобразования Фурье к сдвигу входящие в выражение (4) члены в квадратных скобках — как авто-, так и кросс-корреляционные, могут быть аппроксимированы унимодальными, т. е. имеющими только один максимум, функциями. При этом в кросс-корреляционных функциях работает только максимум, координата которого совпадает с координатой глобального максимума АКФ. Тогда, разложив входящие в четвертое — шестое слагаемые (4) сигнальные образы на сумму общих (полностью коррелированных) и различающихся фрагментов согласно (3), представим восстановленное поле (4) как сумму двух полей: поля общих фрагментов

$$E_{\text{out}}^c(x) = \left[ 1 + (m^{(R)})^2 (n-1) \right] \times \\ \times \left\{ S_k^c(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] \right\} + \\ + (n-1) S_k^c(x + x_k^{(S)}) * [R_k^u(x) \otimes R_l^u(x)] + \\ + (n-1) S_k^c(x + x_k^{(S)}) * [R_k^c(x) \otimes R_l^u(x)] + \\ + (n-1) S_k^c(x + x_k^{(S)}) * [R_k^u(x) \otimes R_l^c(x)] \quad (5)$$

и поля фрагментов различающихся, сиречь частично коррелированных:

$$E_{\text{out}}^u(x) = S_k^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] + \\ + (m^{(R)})^2 \sum_{k \neq l} S_k^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] + \\ + \sum_{k \neq l} S_k^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k^u(x) \otimes R_l^u(x)] + \\ + \sum_{k \neq l} S_k^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k^c(x) \otimes R_l^u(x)] + \\ + \sum_{k \neq l} S_k^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k^u(x) \otimes R_l^c(x)] \quad (6)$$

**Поле общих фрагментов**  $E_{\text{out}}^c(x)$  (5). Амплитуду глобального максимума АКФ опорных образов  $[R_k(x) \otimes R_k(x)]$  согласно [8] оценим выражением:

$$\mu^{\text{АКФ}} = \max[R_k(x) \otimes R_k(x)] = D_{k \text{ out}}^{(R)} L_x^{(R)} L_y^{(R)}, \quad (7)$$

где  $D_{k \text{ out}}^{(R)}$  — дисперсия восстановленного, т. е. с учетом фильтрации на голограмме вследствие нелинейности экспозиционных характеристик ГРС, опорного образца,  $L_x^{(R)}$ ,  $L_y^{(R)}$  — его размеры при прямоугольной апертуре.

В ВКФ различающихся фрагментов опорных образов  $[R_k^u \otimes R_l^u(x)]$  в силу несохранения свойства сдвиговой инвариантности актуальна амплитуда только одного максимума, которая согласно [8] может быть оценена в среднем:

$$\begin{aligned} \mu^{\text{BKФ}} &= \langle [R_k^u(x) \otimes R_l^u(x)] \rangle \approx \\ &\approx D_{k \text{ out}}^{(R)} r_{k \text{ out}} \sqrt{L_x^{(R)u} L_y^{(R)u} 2\pi\kappa} = \\ &= D_{k \text{ out}}^{(R)} \sqrt{L_x^{(R)u} L_y^{(R)u} 2\pi r_{k \text{ out}}^2 \kappa} = \\ &= D_{k \text{ out}}^{(R)} L_x^{(R)u} L_y^{(R)u} \sqrt{2 \frac{\pi r_{k \text{ out}}^2}{L_x^{(R)u} L_y^{(R)u}} \kappa} = \\ &D_{k \text{ out}}^{(R)} L_x^{(R)u} L_y^{(R)u} \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(R)u}}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю,  $r_{k \text{ out}}$  — радиус корреляции восстановленного поля,  $\kappa$  — коэффициент, зависящий от вида корреляционной функции,  $\Omega^{(R)u} = L_x^{(R)u} L_y^{(R)u} / \pi r_{k \text{ out}}^2$  — корреляционная оценка информационной емкости различающегося фрагмента. Для экспоненциальной функции корреляции при не очень низких оценках информационной емкости  $\kappa \approx 0,25$  [8]. Поскольку согласно (3)  $L_x^{(R)u} L_y^{(R)u} = (1 - m^{(R)}) L_x^{(R)} L_y^{(R)}$ , то  $\Omega^{(R)u} = (1 - m^{(R)}) \Omega^{(R)}$  и окончательное выражение для средней амплитуды члена под знаком суммы в третьем слагаемом можно представить в удобном для дальнейшего сравнения виде

$$\begin{aligned} \mu^{\text{BKФ}} &= D_{k \text{ out}}^{(R)} L_x^{(R)u} L_y^{(R)u} \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(R)u}}} = \\ &= D_{k \text{ out}}^{(R)} L_x^{(R)} L_y^{(R)} \sqrt{(1 - m^{(R)}) \frac{2\kappa}{\Omega^{(R)}}} = \\ &\mu^{\text{AKФ}} \sqrt{(1 - m^{(R)}) \frac{2\kappa}{\Omega^{(R)}}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Оценка вклада третьего и четвертого слагаемых в (5) зависит от взаимного расположения общих и различающихся фрагментов в опорных образах. Если они налагаются друг на друга, то подлежит учету корреляционный максимум, амплитуда которого определяется размером минимального из  $R_l^c(x)$  и  $R_k^u(x)$  фрагментов опорных образов. Для этого введем:

$$\begin{cases} t = m^{(R)} & \text{если } m^{(R)} \leq 0,5, \\ t = 1 - m^{(R)} & \text{если } m^{(R)} \geq 0,5. \end{cases} \quad (10)$$

Тогда по аналогии с выводом (9) и с учетом (10) получим

$$\begin{aligned} \mu^{\text{ФBKФ}} &= \langle [R_k^c(x) \otimes R_l^u(x)] \rangle \approx \\ &\approx D_{k \text{ out}}^{(R)} L_x^{(R)} L_y^{(R)} \sqrt{t \frac{2\kappa}{\Omega^{(R)}}} = \mu^{\text{AKФ}} \sqrt{t \frac{2\kappa}{\Omega^{(R)}}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Отсюда, с учетом (10) получим выражение для оценки сверху.

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}^c(x) &= [1 + (m^{(R)})^2 (n-1)] \times \\ &\times \{S_k^c(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)]\} + \\ &+ (n-1) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(R)}}} S_k^c(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] \times \\ &\times (\sqrt{(1 - m^{(R)})} + 2\sqrt{t}) = \\ &= [1 + (n-1)K(m^{(R)})] \{S_k^c(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)]\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $K(m^{(R)})$  — член, зависящий от информационных характеристик опорных образов, в том числе, удельного веса общего фрагмента  $m^{(R)}$ .

$$K(m^{(R)}) = (m^{(R)})^2 + \sqrt{(1 - m^{(R)}) \frac{2\kappa}{\Omega^{(R)}}} + 2\sqrt{r \frac{2\kappa}{\Omega^{(R)}}}.$$

Если общие и различающиеся фрагменты опорных образов пространственно не налагаются, то для получения оценки снизу соответствующим членом (11) в (12) пренебрежем.

Дисперсия восстановленного поля общего фрагмента (12)

$$D_{\Sigma}^c = [1 + (n-1)K(m^{(R)})^2] D_{k \text{ out}}^{(S)c}, \quad (13)$$

где  $D_{k \text{ out}}^{(S)c}$  — дисперсия восстановленного одной НГ общего фрагмента. При полной коррелированности опорных образов  $\rho_{kl}^{(R)} = 1$  оценка (13) совпадает с приближенной, данной в [5].

**Поле различающихся фрагментов  $E_{\text{out}}^u(x)$  (6).**

Поскольку порядок суммирования для всех слагаемых в (6), кроме первого, одинаков, то достаточно оценить удельные веса членов под знаками сумм, которые определяется соответствующими членами в квадратных скобках, поэтому по аналогии с (7) — (11) представим (6) в следующем виде

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}^u(x) &= S_k^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] + \\ &+ (m^{(R)})^2 \sum_{k \neq l} S_l^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] + \\ &+ \sum_{k \neq l} S_l^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] \times \\ &\times \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(R)}}} (\sqrt{(1 - m^{(R)})} + 2\sqrt{t}) = \\ &= S_k^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] + \\ &+ K(m^{(R)}) \sum_{k \neq l} S_l^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)]. \end{aligned} \quad (14)$$

Отсюда дисперсия поля-помехи  $E_{\text{out}}^u(x)$

$$\begin{aligned} D_{\Sigma}^u &= D_{k \text{ out}}^{(S)u} + (K(m^{(R)}))^2 \times \\ &\times D \left( \sum_{k \neq l} S_l^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)] \right) + 2D_{12}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $D_{k \text{ out}}^{(S)u}$  — дисперсия первого слагаемого,  $D_{12}$  — ковариации слагаемых в нижней строке (14).

Второе слагаемое в (14) без учета множителя  $K(m^{(R)})$

$$\begin{aligned}
 D\left(\sum_{k \neq l} S_l^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)]\right) &= \{(n-1)D(S_l^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)]) + (n-1)(n-2)D_{kl \text{ out}}^{(S)u}\} = \\
 &= (n-1)D_{k \text{ out}}^{(S)u} \left(1 + (n-1) \frac{D_{kl \text{ out}}^{(S)u}}{D_{k \text{ out}}^{(S)u}}\right) = (n-1)D_{k \text{ out}}^{(S)u} \left(1 + (n-2) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}}\right),
 \end{aligned} \tag{16}$$

где  $D_{kl \text{ out}}^{(S)u}$  — ковариация восстановленных различающихся фрагментов сигнальных образов.

Ковариацию  $D_{12}$  представим, используя определение коэффициента корреляции  $\rho_{XY} = D_{XY}/\sigma_X\sigma_Y$ , где  $\sigma_X, \sigma_Y$  — среднеквадратичные отклонения [6]

$$\begin{aligned}
 D_{12} &= \rho_{kl \text{ out}}^{(S)u} K(m^{(R)}) \times \sqrt{D(S_k^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)]) D\left(\sum_{k \neq l} S_l^u(x + x_k^{(S)}) * [R_k(x) \otimes R_k(x)]\right)} = \\
 &= D_{k \text{ out}}^{(S)u} \rho_{kl \text{ out}}^{(S)u} K(m^{(R)}) \sqrt{(n-1) \left(1 + (n-2) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}}\right)},
 \end{aligned} \tag{17}$$

где  $\rho_{kl \text{ out}}^{(S)u}$  — коэффициент корреляции различающихся фрагментов. Т. к.  $\rho_{kl \text{ out}}^{(S)u} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}}$  [8], то

$$D_{\Sigma}^u = D_{k \text{ out}}^{(S)u} \left[1 + (K(m^{(R)}))^2 (n-1) \left(1 + (n-2) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}}\right) + 2K(m^{(R)}) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}} \sqrt{(n-1) \left(1 + (n-2) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}}\right)}\right]. \tag{18}$$

Отсюда оценка эффективности выявления общих фрагментов на фоне различающихся.

$$V(n) = \frac{D_{\Sigma}^c}{D_{\Sigma}^u} = \frac{D_{k \text{ out}}^{(S)c}}{D_{k \text{ out}}^{(S)u}} \frac{[1 + (n-1)K(m^{(R)})]^2}{1 + (K(m^{(R)}))^2 (n-1) \left(1 + (n-2) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}}\right) + 2K(m^{(R)}) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}} \sqrt{(n-1) \left(1 + (n-2) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}}\right)}}. \tag{19}$$

### 2.3. Анализ и обсуждение

Поскольку все образы — реализации однородного случайного поля, то  $D_{k \text{ out}}^{(S)c} = D_{k \text{ out}}^{(S)u}$ . Для дальнейшего анализа представим (19) в виде

$$V(n) = \frac{D_{\Sigma}^c}{D_{\Sigma}^u} \propto \frac{[1 + (n-1)K(m^{(R)})]^2}{\left(1 + K(m^{(R)}) \sqrt{(n-1) \left(1 + (n-2) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}}\right)}\right)^2 - 2K(m^{(R)}) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}} \sqrt{(n-1) \left(1 + (n-2) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}}\right)}}. \tag{20}$$

1. С ростом числа НГ  $n$  оценка (20) выходит в насыщение, уровень которого определяется информационными характеристиками только сигнальных образов: оценкой информационной емкости их различающихся фрагментов  $\Omega^{(S)u}$  и вида функции автокорреляции поля (параметром  $\kappa$ ). Для практики достаточно приближенной оценки уровня насыщения.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V(n) \approx \sqrt{\frac{\Omega^{(S)u}}{2\kappa}} \approx \frac{1}{\rho_{kl \text{ out}}^{(S)u}}. \tag{21}$$

Зависимость уровня насыщения (21) только от информационной оценки различающихся фрагментов сигнальных (индуцируемых) образов  $\Omega^{(S)u}$  отражает механизм выявления общих фрагментов сглаживанием фона: с ростом числа НГ  $n$  изменяются только дисперсии различающихся фрагментов, нормированная дисперсия общих фрагментов от  $n$  не зависит.

Этот эффект, определенный в рамках задачи индуктивного обобщения как феномен когнитивного насыщения [9], означает существование эффективного числа обучающих примеров  $n_{\text{эфф}}$ , сверх которого дальнейшего роста эффективности обучения не происходит.

В свою очередь, оценка информационной емкости различающихся фрагментов сигнальных образов  $\Omega^{(S)u}$  зависит от свойств ГРС и условий записи голограмм: ограниченность динамического диапазона ГРС имеет следствием сужение полосы частот, что, в свою очередь, ведет к изменению радиуса корреляции, входящего в выражение для  $\Omega^{(S)u}$ .

2. Характеристики опорных образов: коэффициент их корреляции  $\rho_{kl}^{(R)}$  и оценка информационной емкости  $\Omega^{(R)}$ , входящие в выражение для члена  $K(m^{(R)})$ , играют заметную роль в диапазоне небольших  $n$  при высоких оценках информационной емкости опорных образов  $\Omega^{(R)}$ , влияя на скорость достижения насыщения (21), но не на его величину.

3. Если различающиеся фрагменты сигнальных образов ортогональны, то по определению  $D_{klout}^{(S)u} = 0$  и, с учетом (16) и (17)  $\sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}} \equiv 0$ , откуда (19) принимает вид

$$V(n) = \frac{D_{\Sigma}^c}{D_{\Sigma}^u} = \frac{D_{kout}^{(S)c}}{D_{kout}^{(S)u}} \frac{[1 + (n-1)K(m^{(R)})]^2}{[1 + (n-1)K(m^{(R)})^2]}. \quad (22)$$

Для не малых  $n$  выражение (22) можно аппроксимировать линейной зависимостью.

Если опорные образы полностью коррелированы, то  $K(m^{(R)}) = 1$  и тогда имеем оценку:

$$V(n) = \frac{D_{\Sigma}^c}{D_{\Sigma}^u} \approx \frac{D_{kout}^{(S)c}}{D_{kout}^{(S)u}} \frac{[1 + (n-1)K(m^{(R)})^2]^2}{1 + (K(m^{(R)}))^4 (n-1) \left( 1 + (n-2) \sqrt{\frac{2k}{\Omega^{(S)u}}} \right) + 2K(m^{(R)})^2 \sqrt{\frac{2k}{\Omega^{(S)u}}} \sqrt{(n-1) \left( 1 + (n-2) \sqrt{\frac{2k}{\Omega^{(S)u}}} \right)}}. \quad (24)$$

Если общий фрагмент не доминирует  $\sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}} \ll 1$ , то аппроксимативное выражение

$$V(n) \approx \frac{D_{kout}^{(S)c}}{D_{kout}^{(S)u}} \frac{[1 + (n-1)K(m^{(R)})^2]^2}{1 + (K(m^{(R)}))^4 (n-1) \left( 1 + (n-2) \sqrt{\frac{2k}{\Omega^{(S)u}}} \right)}. \quad (25)$$

(25) сравнительно с (19) дает ошибку при  $n < n_{эфф}$ , но при  $n \approx n_{эфф}$  (19) и (25) сравнимы.

### 3. Моделирование

Для подтверждения теоретических выводов моделировался классический вариант индуктивного обобщения (порождения понятий) на примере обращения силлогизма Darii:

Пара связанных образов 1: *Сократ человек, Сократ смертен*;

Пара связанных образов 2: *Платон человек, Платон смертен*;

Пара связанных новых понятий 2: *Все люди смертны*.

Образы: опорные в голографии или индексные в индуктивном выводе «Сократ человек» и «сигналь-

$$V(n) = \frac{D_{\Sigma}^c}{D_{\Sigma}^u} = n \frac{D_{kout}^{(S)c}}{D_{kout}^{(S)u}}. \quad (23)$$

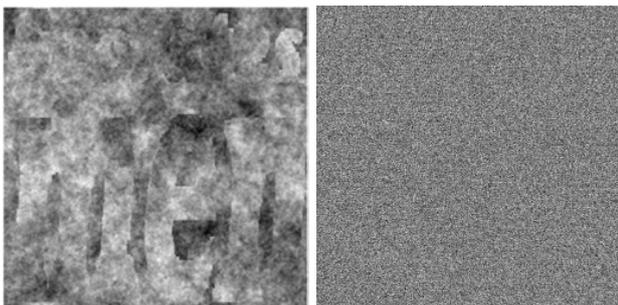
4. Выражения (19) и (20) достаточно громоздки, поэтому представляет интерес нахождение более простого аппроксимативного выражения, пригодного для практики. Аппроксимативная формула должна давать приемлемые оценки уровня насыщения, т. е. эффективного числа НГ  $n_{эфф}$ . С этой точки зрения, для не малых оценок информационной емкости различающихся фрагментов опорных образов  $\Omega^{(R)u}$  можно принять  $K(m^{(R)}) \approx (m^{(R)})^2$ , откуда

ные или индуцируемые «Сократ смертен» были реализациями случайного поля размером  $256 \times 256$  пкс. и включали фрагменты:

– общие для всех последовательности опорных образов реализаций поля в виде надписей «Men» и, аналогично, общей для сигнальных образов — «Mortal», их удельные веса (3)  $(1 - m^R) = 0,369$  и  $(1 - m^S) = 0,375$ , соответственно;

– различающиеся, включающие также и индивидуальные имена — разные реализации поля с теми же самыми статистическими характеристиками.

Методом пространственной фильтрации (фильтр Гаусса) изготовлено несколько аналогичных последовательностей образов, отличающихся радиусом корреляции поля: он изменялся от  $r < 1$  (дельта-коррелированное поле) до  $r = 10$  пкс. Соответственно менялись и оценки информационной емкости  $\Omega$ , в том числе, и

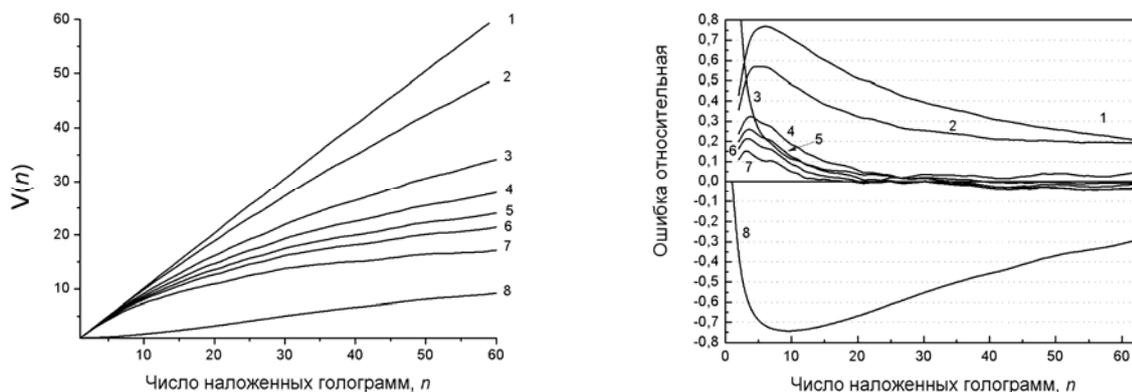


а) Опорный образ «Сократ человек» — реализация двумерного ФБД  
б) Опорный образ «Сократ человек» — реализация дельта-коррелированного поля

Рис. 2. Опорные образы

Таблица 1. Информационные характеристики образов

№	$r_{corr}$	$\Omega^{(S)u}$	$\Omega^{(S)c}$	$\lim_{n \rightarrow \infty} V(n)$
1	$r < 1$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	1	13050	7815	161
3	2	3260	1954	80
4	3	1450	868	54
5	4	815	488	40
6	5	521	312	32
7	7,5	232	139	21,5
8	10	130	78	16



а) Зависимость оценки эффективности выявления от числа НГ

б) Относительная ошибка оценки эффективности выявления от числа НГ

Рис. 3.

входящая в (19)  $\Omega^{(S)u}$ . На рисунке 2а представлен опорный образ, приготовленный как реализация поля, описываемого моделью двумерного фрактального Броуновского движения с параметром Хёрста  $H = 0,1$ . На рисунке 2б представлен тот же образ, но для дельта-коррелированного поля — разрушена внутренняя коррелированность и надписи, читавшиеся на рисунках 2а и 2б, теперь визуально не выделяются.

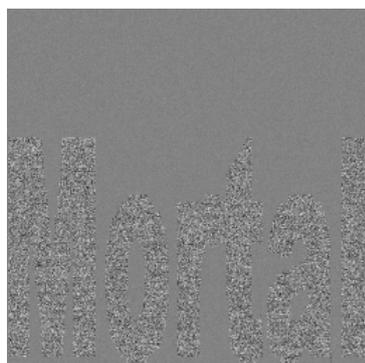
Моделировалась запись 63 НГ, в восстановленном мультиплексной голограммой поле измерялось отношение дисперсий  $V(n)$ . Предполагался линейный динамический диапазон ГРС. Параметры образов, соответствующие кривым на рисунке 3, даны в таблице 1, радиусы корреляции соответствуют радиусам размытия дельта-коррелированного поля по Гауссу.

На рисунке 3а даны экспериментальные зависимости  $V(n)$  для ряда оценок информационной емкости различающихся фрагментов сигнальных образов, на рисунке 3б — относительные ошибки теоретической оценки (20). На рисунке 4 в качестве иллюстраций даны примеры восстановленных полей при  $n = 63$  для дельта-коррелированного поля (рисунок 4а), радиусов корреляции 2 пкс (рисунок 4б) и 10 пкс (рисунок 4в, таблица 1, строки 1, 3 и 8 соответственно).

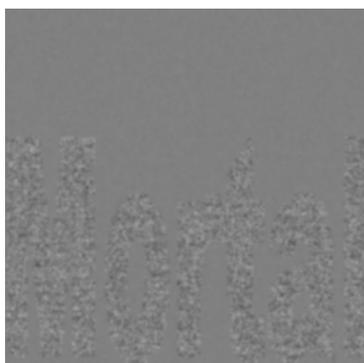
1. С ростом числа НГ  $n$  точность теоретической оценки (20) возрастает. Поскольку для аналоговой обработки погрешность 10 % считается нормой, то точность оценки (20) при  $n \geq 15$  и «разумных» оценок информационной емкости образов 3–7 (таблица 1) удовлетворительна.

2. Выражение (20) дает неудовлетворительную оценку для образов как реализаций дельта-коррелированных полей (кривые 1 и 2). Это обусловлено тем, что при полном разрушении внутренней коррелированности образов информация превращается в белый шум, что сопровождается резким ростом дисперсии образов. Последнее не учитывалось при выводе (20). В то же время, метод эффективно выявляет из шума сокрытую информацию — надпись, не различимая в эталоне (рисунок 2б), читается в восстановленном 63-я НГ образе (рисунок 4а).

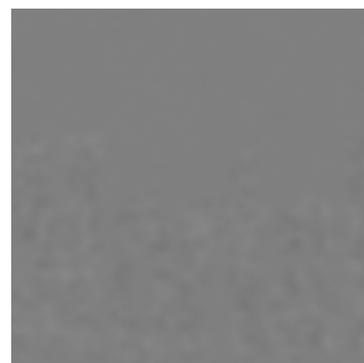
3. Выражение (20) также неудовлетворительно при крайне низкой оценке информационной емкости общего фрагмента  $\Omega^{(S)c}$  (кривая 8). На рисунке 4в наглядно видна причина этого — механизм сглаживания фона  $E_{out}^u(x)$  работает так же эффективно, но сам общий фрагмент «столь малоинформативен  $\Omega^{(S)c} = 78$ , что даже на ровном фоне практически не читается».



а) Восстановленный 63-я НГ образ — реализация дельта-коррелированного поля



б) Восстановленный 63-я НГ образ при радиусе корреляции  $r = 2$



в) Восстановленный 63-я НГ образ при радиусе корреляции  $r = 10$

Рис. 4. Восстановленные образы

### Заключение

Таким образом, метод наложенных голограмм Фурье позволяет решить задачу выявления общих фрагментов образов. Для схемы совместного преобразования, т. е. с пространственно-модулированными опорными образами, разделение образов на сигнальные и опорные условно и использовано только для удобства анализа, результаты которого «симметричны» в том смысле, что полностью правомочны и для образов, обозначенным как опорные. В результате, общие фрагменты выявляются одновременно в обеих наборах образов: сигнальных и опорных. В контексте бионического подхода к моделированию интеллектуальных функций, в частности, к индуктивному порождению понятий, этот результат имеет принципиальное значение, т. к. в биологических системах, как и в голографии, образы запоминаются всегда попарно, посредством запоминания их связей. Соответственно, и понятия порождаются также в рамках ассоциативного принципа — не изолированно, но парами ассоциированных понятий.

Эффективность выявления общих фрагментов определяется оценкой информационной емкости различающихся фрагментов сигнальных образов. Полученная теоретическая оценка дает удовлетворительную точность сравнительно с экспериментальными дан-

ными при «разумных» значениях информационных характеристик образов — в первую очередь, необходима достаточная информационная емкость общих фрагментов, они должны быть заметны.

Показано, что зависимость эффективности выявления общих фрагментов от числа наложенных голограмм имеет нелинейный характер, выходя в насыщение, уровень которого определяется оценкой информационной емкости различающихся фрагментов сигнальных образов. Этот феномен, определенный как феномен когнитивного насыщения, отражает механизм, обеспечивающий выявление общих фрагментов — сглаживание по мере роста числа наложенных голограмм различающихся фрагментов как фона. Зависимость уровня насыщения от информационных характеристик образов, определяемых, в свою очередь, характеристиками сенсоров, сенсорных трактов и регистрирующих сред, отражает субъективность способности к обучению, понимаемую как её зависимость от индивидуальных свойств материального носителя интеллекта (сенсоров, сенсорных трактов и нейросети) познающего агента.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 15-01-04111-а.

### Список источников

- [1] **Микаэлян, А. Л.** Запись большого числа изображений методом наложения голограмм / А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев // ДАН СССР. — 1970. — Том 191. — № 4. — 799 с.
- [2] **Longuet-Higgins, H. C.** Holographic model of temporal recall / H. C. Longuet-Higgins // Nature. — 1968. — Vol. 217. — P. 104.
- [3] **Gabor, D.** Holographic model of temporal recall / D. Gabor // Nature. — 1968. — Vol. 217. — P. 584.
- [4] **Павлов, А. В.** Анализ обобщения серии образов наложенными голограммами Фурье / А. В. Павлов // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2015. — Том 58. — № 10. — С. 80–86.
- [5] **Павлов, А. В.** Выявление коррелированных фрагментов в последовательности образов наложенными голограммами Фурье / А. В. Павлов / Квантовая электроника. — 2016. — Том 46. — № 8. — С. 759–765
- [6] **Яглом, А. М.** Корреляционная теория стационарных случайных функций / А. М. Яглом. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 280 с.
- [7] **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей: Учеб. для вузов / Е. С. Вентцель; 6-е изд. стер. — М.: Высш. шк., 1999. — 576 с.
- [8] **Шубников, Е. И.** Отношение сигнал/помеха при корреляционном сравнении изображений / Е. И. Шубников // Оптика и спектроскопия. — 1987. — Том 62. — № 2. — С. 450–456.
- [9] **Павлов, А. В.** Когнитивное насыщение при индуктивном порождении понятий на нейросетях / А. В. Павлов // Пятнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием — 2016. — Том 2. — С. 274–282

## An analysis of the detection of common fragments in a sequence of images by superimposed Fourier holograms: cognitive saturation phenomenon

*A. V. Pavlov*

Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

Refined analysis of inductive generalization by superimposed Fourier holograms technique is presented. The task of inductive generalization is considered as a task of common fragments in a sequence of images is considered. The images are described by stochastic field realizations. An estimation of the detection efficiency is proposed. The estimation dependence of the number of volume superimposed holograms, dynamical range of the recording media, and information capacity of the images is derived. Theoretical conclusions are confirmed by the numerical modeling results.

**Keywords:** Fourier holography, Superimposed holograms, Multiplex hologram, Volume hologram, Holographic recording medium, Holographic memory, Correlation, Inductive generalization, Inductive concepts generation, Cognitive saturation.

### 6.3. Применение амплитудных масок для улучшения характеристик систем оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением

Н. Н. Евтихийев, В. В. Краснов, А. В. Шифрина

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Представлены результаты применения дополнительных входных амплитудных масок в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Использование амплитудных масок позволяет повысить отношение сигнал/шум в декодированных изображениях и визуальную скрытность кодированных изображений.

**Ключевые слова:** Оптика, Голография, Оптическое кодирование, Некогерентное освещение, Амплитудные маски.

В настоящее время активно развиваются методы оптического кодирования информации. Методы, использующие пространственно-некогерентное освещение, обладают рядом существенных преимуществ.

Были разработаны методы повышения отношения сигнал/шум (ОСШ) в декодированном изображении и повышения визуальной скрытности кодированного изображения в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Методы заключаются в применении дополнительных входных амплитудных масок (рисунок 1) различных типов.

Амплитудные маски первого типа представляют собой двумерные бинарные решётки.

Наложение решётки приводит к мультиплицированию спектра изображения. При декодировании это сохраняет большее количество информационных частот.

На рисунке 2 представлен результат численного моделирования применения амплитудной маски. Эффективность метода оценивалась по увеличению ОСШ по сравнению с кодированием без амплитудной маски. По оси абсцисс отложено отношение величины пика на нулевой пространственной частоте в спектре ключа к среднему уровню его спектра (ОПС).

Наиболее эффективен метод разряжения при использовании ключей с ОПС в диапазоне от 2 до 20: увеличение ОСШ составило 2 и более раз.

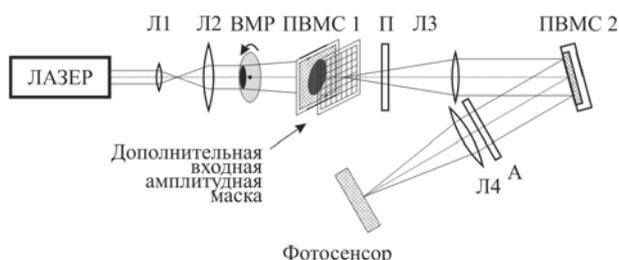
Амплитудные маски второго типа представляют собой двумерные бинарные случайные амплитудные маски. Метод взаимодополняющих масок заключается

в создании знакопеременного кодированного изображения путём вычитания из кадра, кодированного с использованием случайной амплитудной маски, кадра, кодированного с использованием её негатива. Данный метод применяется для повышения визуальной скрытности кодированного изображения и расширения его Фурье-спектра. На рисунке 3 представлены спектры изображений, кодированных без использования метода взаимодополняющих масок и с его использованием.

Возможно совместное использование различных методов с целью обеспечения одновременного увеличения ОСШ и повышения визуальной скрытности. На рисунке 4 представлены примеры кодированных и декодированных изображений при совместном использовании разряжающих и взаимодополняющих амплитудных масок.

Результаты проведённых численных экспериментов демонстрируют, что визуальная скрытность при использовании амплитудных масок увеличивается более чем в 10 раз, отношение сигнал/шум увеличивается в среднем в 2 раза.

Были проведены предварительные оптические эксперименты. На рисунке 5 представлены результаты оптического кодирования изображения «Lenna» без использования амплитудной маски и с её использованием. Результаты оптического эксперимента соотносятся с результатами численного моделирования: использование дополнительных входных амплитудных



Л1 и Л2 — линзы коллиматора. ВМР — вращающийся матовый рассеиватель. На ПВМС1 выводится кодируемая информация.

Поляризатор П и анализатор А выделяют требуемые ПВМС направления поляризации. Линзы Л3 и Л4 реализуют 4f-схему. На ПВМС2 выводится кодирующий ДООЭ. Фотосенсор регистрирует кодированное изображение

Рис. 1. Схема оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением с использованием дополнительной входной амплитудной маски

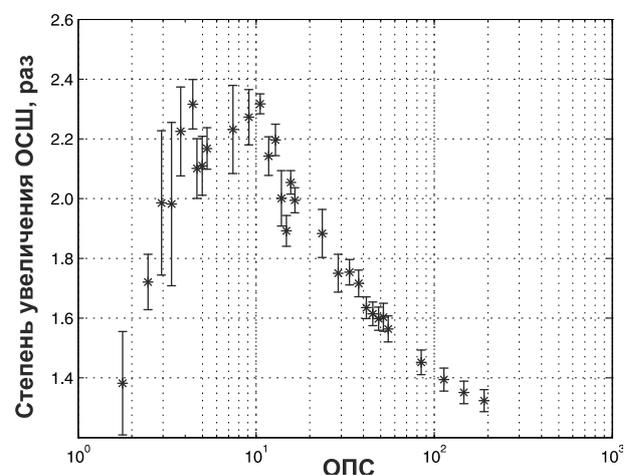


Рис. 2. Зависимость величины увеличения отношения сигнал/шум при применении входной амплитудной маски по сравнению с кодированием без амплитудной маски от ОПС ключей кодирования

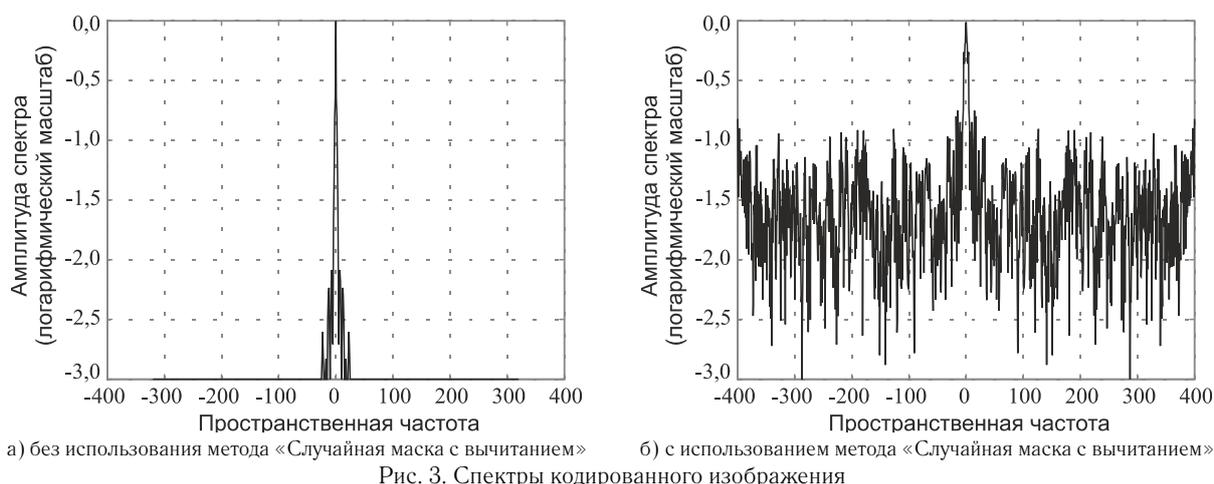
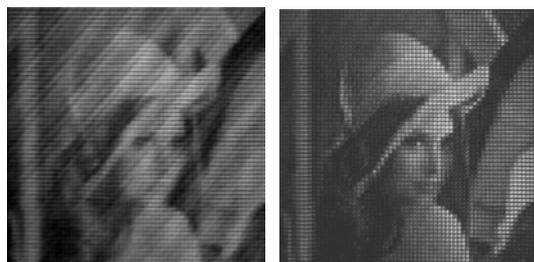


Рис. 3. Спектры кодированного изображения



а) без амплитудных масок      б) с амплитудными масками      в) без амплитудных масок      г) с амплитудными масками

Рис. 4. Кодированные изображения (а и б) и соответствующие декодированные изображения (в и г)



а) без амплитудных масок      б) с амплитудными масками

Рис. 5. Декодированные изображения, полученные в результате оптических экспериментов

масок повышает качество декодированных изображений по сравнению с кодированием без масок.

Таким образом, предложены два типа дополнительных входных амплитудных масок для систем оптического кодирования с пространственно некогерентным освещением — прямоугольные решетки и взаимодополняющие случайные. Проведены численные и оптические эксперименты. Результаты экспериментов демонстрируют увеличение отношения сигнал/шум в декодированных изображениях до 2,3 раз.

#### Список источников

- [1] **Refregier, P.** Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding / P. Refregier, B. Javidi // *Optics Letters*. — 1995. — Vol. 20. — № 7. — P. 767–769.
- [2] **Unnikrishnan, G.** Optical encryption by double-random phase encoding in the fractional Fourier domain / G. Unnikrishnan, J. Joseph, K. Singh // *Optics Letters*. — 2000. — Vol. 25. — № 12. — P. 887–889.
- [3] **Краснов, В. В.** Оптическое кодирование массивов двоичных чисел в пространственно-некогерентном свете / В. В. Краснов, С. Н. Стариков, Р. С. Стариков, П. А. Черёмхин // *Известия вузов. Физика*. — 2015. — Том 58. — № 10. — С. 29–36.
- [4] **Evtikhiev, N. N.** Method of optical image coding by time integration / N. N. Evtikhiev, S. N. Starikov, P. A. Cheryomkhin, V. V. Krasnov, V. G. Rodin // *Proceedings of SPIE*. — 2012. — Vol. 8429. — P. 8429I.
- [5] **Cathey, W. T.** New paradigm for imaging systems / W. T. Cathey, E. R Dowski // *Applied Optics*. — 2002. — Vol. 41. — № 29. — P. 6080–6092.
- [6] **Cheremkhin, P. A.** Generation of keys for image optical encryption in spatially incoherent light aimed at reduction of image decryption error / P. A. Cheremkhin, N. N. Evtikhiev, V. V. Krasnov, V. G. Rodin, S. N. Starikov // *Proceedings of SPIE*. — 2014. — Vol. 9131. — P. 913125. — DOI: 10.1117/12.2052723.
- [7] **Li, J.** Optical image encryption and hiding based on a modified Mach-Zehnder interferometer / J. Li, L. Shen, Y. Pan, R. Li // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22. — No. 4. — P. 4849–4860. — DOI: 10.1364/OE.22.004849.
- [8] **Liu, Z.** Color image encryption by using the rotation of color vector in Hartley transform domains / Z. Liu, J. Dai, X. Sun, S. Liu // *Optics and Lasers in Engineering*. — 2010. — Vol. 48. — P. 800–805. — DOI: 10.1016/j.optlaseng.2010.02.005.
- [9] **Barrera, J. F.** Optical encryption and QR codes: Secure and noise-free information retrieval / J. F. Barrera, A. Mira, R. Torroba // *Optics Express*. — 2013. — Vol. 21. — № 5. — P. 5373–5378. — DOI: 10.1364/OE.22.004849.

## **Application of input amplitude masks in scheme of optical image encryption with spatially-incoherent illumination**

*N. N. Evtikhiev, V. V. Krasnov, A. V. Shifrina*

National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

Results of application of additional input amplitude masks in scheme of optical image encryption with spatially-incoherent illumination are presented. Application of amplitude masks allows to increase signal-to-noise ratio in decrypted images and to enhance the optical encryption security of encrypted images.

**Keywords:** Optics, Holography, Optical encryption, Incoherent illumination, Amplitude masks.

## 6.4. Некогерентный коррелятор с использованием микрозеркального модулятора для отображения голографических фильтров

Д. Ю. Молодцов, В. В. Краснов, П. А. Черёмхин, В. Г. Родин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Представлена экспериментальная установка оптического коррелятора, собранная по схеме с одним объективом, в котором в качестве устройства отображения голографических фильтров использован микрозеркальный-модулятор. Проведённые эксперименты по распознаванию тестовых объектов при динамическом выводе голографических фильтров на модулятор показали высокую степень распознавания объектов в корреляторе при квазимонохроматическом пространственно-некогерентном входном излучении.

**Ключевые слова:** Голографический фильтр, Микрозеркальный модулятор, Некогерентное излучение, Корреляционный анализ.

### Введение

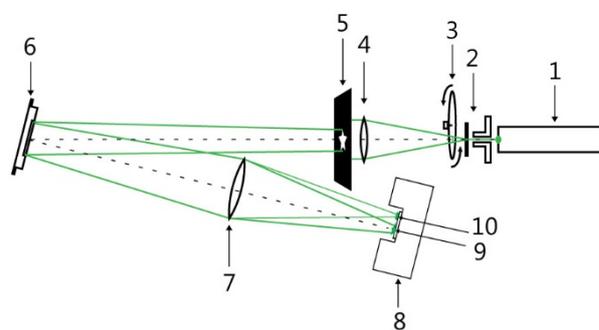
В оптических корреляторах — устройствах, предназначенные для распознавания объектов по ряду их характеристик — в качестве фильтра-памяти обычно используют фурье-голограммы, в т.ч. синтезированные на компьютере. Вывод таких голограмм может осуществляться при помощи пространственно-временных модуляторов света (ПВМС). В большинстве голографических корреляторах используются жидкокристаллические (ЖК) ПВМС, однако существенными недостатками таких модуляторов являются наличие флуктуаций фазы не только для фазовых, но даже для амплитудных ЖК ПВМС, относительно низкая контрастность выводимых изображений и невысокое быстродействие (порядка 60 Гц). Другой тип модуляторов — микрозеркальные модуляторы осуществляют амплитудную модуляцию с помощью отражения светового потока от матрицы микрозеркал, поэтому излучение не претерпевает паразитную фазовую модуляцию. В последнее время широко развилась технология создания таких модуляторов, быстродействие их на три порядка превышает быстродействие ЖК ПВМС. Таким образом, совокупность характеристик микрозеркальных модуляторов позволяют сделать предположение, что современные типы таких модуляторов могут быть успешно использованы в качестве устройств оперативного вывода голографических фильтров в установках некогерентных оптических корреляторов.

### 1. Экспериментальная установка оптического коррелятора на основе микрозеркального модулятора

В настоящее время существует несколько возможностей реализаций некогерентных оптических корреляторов. Используемый в работе коррелятор построен по схеме, использующей только один объектив для формирования корреляционного распределения, это, в отличие от традиционной  $4f$ -схемы построения, позволяет оперативно подстраивать масштаб распознаваемых изображений. Применение такой схемы особенно целесообразно, так как распознавание в корреляторе осуществляется в пространственно-некогерентном свете. В выходной плоскости коррелятора формируется корреляционный сигнал по интенсивности, а не по амплитуде, как в когерентном корреляторе,

что позволяет устранить фазовые искажения, влияющие на качество корреляционного сигнала.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Излучение от твердотельного лазера 1 (длина волны 532 нм) проходит через коллимирующую систему (микрообъектив 2, диафрагма и объектив с фокусным расстоянием 210 мм 4), в которой установлен вращающийся матовый рассеиватель 3 для разрушения пространственной когерентности излучения. Далее излучение проходит через транспарант 5 с изображением тестового объекта для распознавания. Этот блок схемы имитирует самосветящийся объект, излучающий пространственно-некогерентное излучение. Также возможен ввод объекта и при помощи модулятора света. Далее это излучение отражается от DMD-модулятора 6 с выведенным на нем голографическим фильтром, заранее синтезированным на компьютере под необходимый опорный объект. В выходной плоскости коррелятора расположена камера 8, регистрирующая формируемую объективом 7 структуру, включающую нулевой порядок 9 (изображение объекта) и первый порядок дифракции 10 (область корреляционного сигнала).



1 — лазер; 2 — микрообъектив с диафрагмой; 3 — вращающийся матовый рассеиватель; 4 — коллимирующий объектив; 5 — транспарант с изображением распознаваемого объекта; 6 — DMD-модулятор с выведенным на нем голографическим фильтром; 7 — объектив; 8 — регистрирующая камера; 9 — нулевой порядок (изображение объекта); 10 — первый порядок дифракции (область корреляционного сигнала)

Рис. 1. Схема экспериментальной установки некогерентного голографического коррелятора на основе микрозеркального модулятора

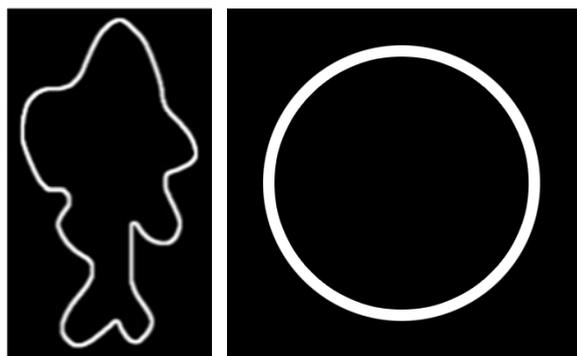
В экспериментальной установке был использован микрозеркальный модулятор, произведённый компанией Texas Instruments 0.7 XGA 12e DDR (серия DLP7000). Для регистрации корреляционных сигналов использовалась камера Canon EOS 400D. Для проведения экспериментов было создано программное обеспечение, с помощью которого осуществлялось формирование опорного образа объекта, последующее его преобразование в голограмму и ее бинаризация. Эта же программа позволяет осуществлять динамический вывод голографических фильтров на микрозеркальный модулятор и переключаться на ранее синтезированные фильтры, выбирая их из списка. Скорость переключения, определяющаяся возможностями модулятора, составила около 10 мкс, что позволяет максимально быстро зарегистрировать выходной сигнал и определить, как на него повлияли какие-либо изменения параметров голографического фильтра или опорного объекта.

**2. Экспериментальные результаты по распознаванию тестовых объектов в некогерентном корреляторе на основе микрозеркального модулятора**

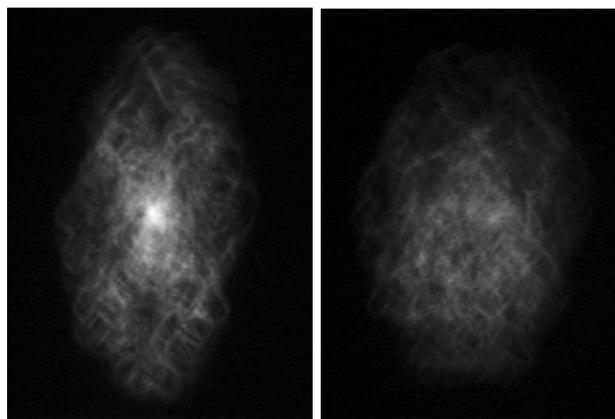
В качестве тестовых распознаваемых объектов использовались различные контурные изображения, например, изображения контуров рыбы и круга (рисунок 2). В выходной плоскости коррелятора формировались дифракционные порядки: в нулевом — изображение входного объекта, в первом — корреляционное распределение, по наличию в котором локализованного интенсивного пика можно сделать вывод о совпадении пространственных характеристик опорного и входного объектов.

На рисунке 3 слева приведено зарегистрированное в первом порядке распределение при совпадении объектов (контуров рыбы на рисунке 2а), а справа в случае несовпадения объектов. Из приведённых фотографий видно, что при совпадении объектов в области корреляционного сигнала наблюдается достаточно хорошо локализованный пик. При изменении входного объекта, данный пик полностью деградирует.

На рисунке 4 представлены результаты распознавания в случае, когда входной объект оставался неизменным, а на модулятор последовательно выводились



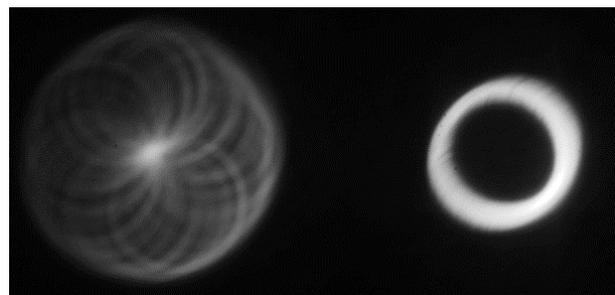
а) контур рыбы б) контур круга  
Рис. 2. Изображения тестовых объектов



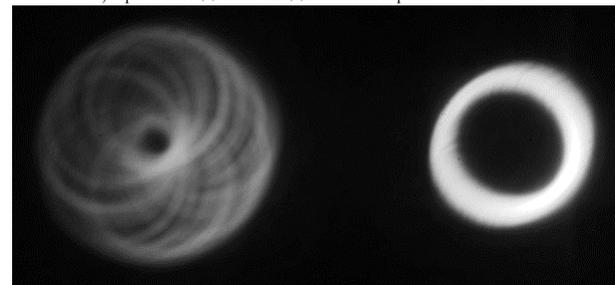
а) при совпадении объектов б) при несовпадении объектов  
Рис. 3. Вид корреляционного

голограммы-фильтры, синтезированные для различных объектов. При совпадении форм входного и опорного объектов (рисунок 2б) наблюдается сигнал распознавания (рисунок 4а). При несовпадении масштаба объектов (опорный объект больше входного) и формы объекта (опорный объект является контуром рыбы) локализованные корреляционные пики отсутствуют

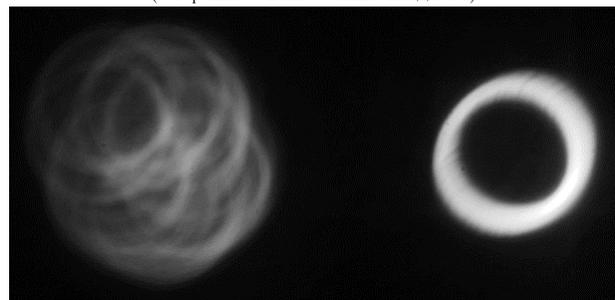
распределения



а) при совпадении входного и опорного объектов



б) при несовпадении масштаба объектов (опорный объект больше входного)



в) при несовпадении формы объектов (опорный объект — контур рыбы)

Рис. 4. Изображения сигналов на выходе коррелятора для объекта с рисунка 2б

(рисунки 4б и 4в соответственно). Таким образом, подтверждается эффективность работы коррелятора при динамическом изменении параметров распознавания.

Производительность некогерентного коррелятора при использовании в нём микрозеркального модулятора определяется временем переключения элементов матрицы модулятора при выводе голографических фильтров, которая составляет около 10 мкс. Таким образом, оказывается возможным формирование  $10^5$  корреляций за секунду.

### Заключение

Несмотря на успешное применение микрозеркальных модуляторов в оптических исследованиях, их использование в оптических корреляторах пока не получило широкого распространения. В данной работе

была представлена экспериментальная установка оптического коррелятора, собранная по схеме с одним объективом. В корреляторе использовано квазимонохроматическое пространственно-некогерентное освещение, голографический фильтр-память динамически выводится на микрозеркальный модулятор. Были проведены эксперименты по распознаванию тестовых объектов при динамическом выводе голографических фильтров, проведена оценка максимальной производительности такого некогерентного коррелятора. В проведённых экспериментах получено, что при совпадении входного и опорного объектов наблюдался хорошо локализованный корреляционный пик, позволяющий сделать вывод об успешном распознавании объектов в некогерентном корреляторе при использовании микрозеркального модулятора.

### Список источников

- [1] **Molodtsov, D. Yu.** Object recognition in non-coherent optical correlator based on DMD-modulator illumination / D. Yu. Molodtsov, V. G. Rodin // Proceedings of SPIE. — 2016. — Vol. 10176. — P. 101761A.
- [2] **Molodtsov, D. Yu.** Impact of DMD-SLMs errors on reconstructed Fourier holograms quality / D. Yu. Molodtsov, P. A. Cheremkhin, V. V. Krasnov, V. G. Rodin // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 737. — P. 012074.

## Non-coherent correlator with using DMD-modulator for holographic filters displaying

*D. Yu. Molodtsov, V. V. Krasnov, P. A. Cheremkhin, V. G. Rodin*  
National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

The experimental setup of the optical correlator was assembled according to the scheme with one lens. DMD-modulator was used as output device of holographic filters. The experiments on recognition of test objects with dynamic displaying of holographic filters on the modulator were performed. The obtained results allow to conclude about the successful objects recognition in this scheme of non-coherent correlator with using DMD-modulator.

**Keywords:** Holographic filter, DMD-modulator, Non-coherent radiation, Correlation analysis.

## 6.5. Способ диагностики внутренней структуры композитных материалов по анализу параметров цифровых спекл-фотографий

А. Н. Малов<sup>1</sup>, П. В. Павлов<sup>2</sup>, М. О. Астахов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия

Рассматриваются способы неразрушающего исследования деталей из композитных материалов с использованием метода спекл-структур оптического излучения лазерных диодов. Представлены результаты экспериментального определения глубины залегания дефектов во внутренней структуре деталей из композитных материалов по параметрам цифровых спекл-фотографий.

**Ключевые слова:** Корреляция, Спекл, Неразрушающий контроль, Диагностика, Композит, Лазер.

### Введение

К конструкциям современным летательным аппаратам предъявляется ряд требований, которыми должны обладать материалы для их изготовления, к каковым относятся: минимальная масса, максимальная прочность и жесткость, максимальный ресурс в эксплуатации и высокая надежность. Для таких условий лучше всего подходят композитные материалы. Обеспечение качества выпускаемой продукции из композитных материалов возможно только при применении современных методов и средств неразрушающего контроля (НК) [1]. На сегодняшний момент в области совершенствования оптических методов и устройств НК выполнен ряд исследований [2, 3] которые подтвердили возможность использования метода спекл-структур оптического излучения (МССОИ) для выполнения операций по НК деталей из композитных материалов. Основным недостатком предлагаемых способов НК являлось то, что они позволяют лишь определять наличие и размеры внутреннего дефекта, но не позволяют установить глубину его залегания во внутренней структуре материала. Способность устройств НК определять глубину, на которой находится внутренний дефект (непроклей, расслоение) позволит улучшить технологию ремонта выпускаемой продукции, за счет повышения выхода готовой продукции при дефиците исходного материала и высокой цене конечного продукта.

Цель настоящей работы заключалась в разработке и практической реализации способа НК композитных материалов, позволяющего определять глубину залегания дефекта во внутренней структуре детали из композитного материала.

### Способ определения глубины залегания дефекта во внутренней структуре детали из композитного материала

Для определения глубины залегания внутреннего дефекта (непроклея) во внутренней структуре композитного материала предлагается использовать способ НК, принцип действия которого заключается в следующем: на первом этапе, как показано на рисунке 1, осуществляют поэтапное зондирование контролируемой поверхности, при этом на первом этапе поверхность контролируемого объекта зондируют с мощностью ис-

точника когерентного излучения (КИ), равной  $P_0$ , соответствующей полному отражению КИ от контролируемой поверхности, а на последующих этапах зондируют с мощностью источника КИ равной (1):

$$P_n = \exp(2n\alpha z)P_{n-1}, \quad (1)$$

где  $n = 1 \dots N$ , соответствующей полному отражению КИ от поверхности подповерхностного слоя контролируемого объекта на глубине  $nz$ , где  $N = l/z$  — количество контролируемых слоев,  $P_n, P_{n-1}$  — мощность источника КИ при  $n$ -ом,  $(n-1)$ -ом этапе зондирования соответственно,  $\alpha$  — коэффициент поглощения контролируемого объекта и  $Z$  — толщина контролируемого слоя при  $n$ -ом зондировании, определяют разность интенсивностей спекл-изображений, зарегистрированной при  $n$ -ом этапе со спекл-изображением, регистрируемым при мощности КИ равной  $P_0$  [4].

Далее вычисляют интервал корреляции этой разности и сравнивают его с эталонным интервалом корреляции спекл-изображения, если выполняется условие  $r_{kor, n, 0} < r_{kor \text{ разности}}$ , где  $r_{kor, n, 0}$  — интервал корреляции разности спекл-изображений, зарегистрированных при мощности КИ  $P_0$  и  $n$ -ом и этапе зондирования, а  $r_{kor \text{ разности}}$  — интервал корреляции разности эталонного спекл-изображения, полученной от неповрежденного слоя при соответствующей мощности облучения  $P_n$ , то принимают решение о нарушении внут-

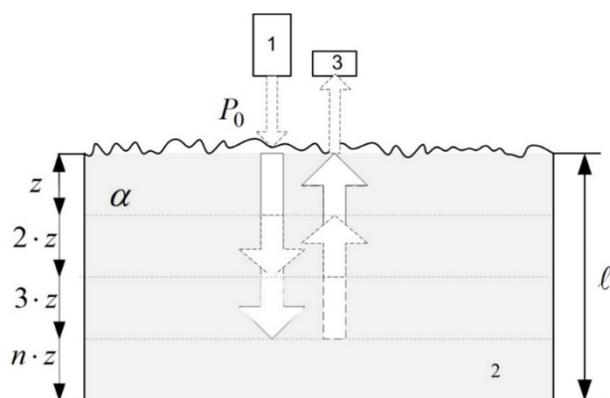
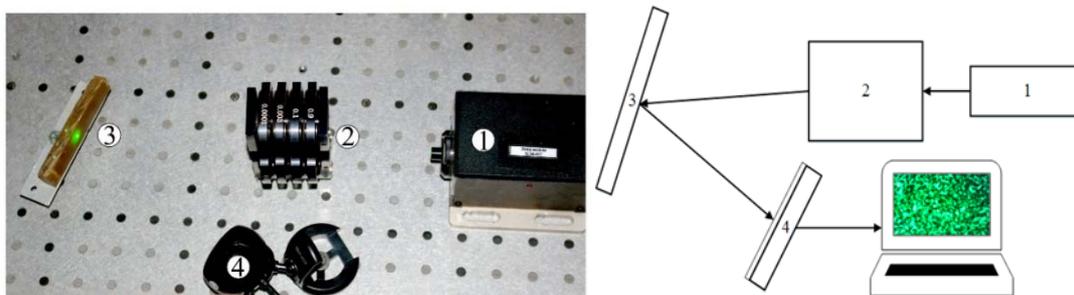


Рис. 1. Принцип реализации способа НК внутренней структуры полупрозрачного материала



1 — лазер SLM-417 ( $\lambda = 532$  нм); 2 — аттенуатор; 3 — композит; 4 — ПЗС-матрица  
Рис. 2. Внешний вид и схема экспериментальной установки используемой в эксперименте

ренной структуры контролируемого объекта на глубине  $nz$  и прекращают дальнейшее измерение, в противном случае осуществляют повторное зондирование с увеличением мощности сигнала в соответствии с выражением (1).

### Экспериментальное исследование способа неразрушающего контроля внутренней структуры композитных материалов.

Способ неразрушающего контроля подповерхностной структуры полупрозрачных объектов применяется для определения наличия дефекта в полупрозрачных (композитных) материалах, а также для определения глубины его залегания. Для экспериментального исследования был подготовлен образец из композитного материала лопасти несущего винта вертолета МИ-28Н — препрег стеклонить ВПС-7 со связующим ЭДТ-ЮП толщиной 10 мм. Во внутренней структуре данного объекта на глубине 2,5 и 5 мм имитировались дефекты сквозными отверстиями диаметром 2 мм.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.

В ходе эксперимента зондированию было подвергнуто три участка контролируемого объекта: 1 — не поврежденный участок (без дефекта); 2 — участок с внутренним дефектом на глубине 2,5 мм; 3 — участок с внутренним дефектом на глубине 5 мм. Зондирование осуществлялось в несколько этапов от использования излучения с минимальной до максимальной мощности с последующей регистрацией спекл-изображений на ПЗС-матрицу разрешением  $640 \times 480$  пикселей. Мощность зондируемого излучения изменялось с помощью установленного коэффициента пропускания светофильтра аттенуатора, при этом мощность лазера была максимальной и соответствовала 20 мВт.

После зондирования, регистрируемые спекл-изображения, представленные в таблице (верхний ряд) подвергались обработки с помощью специализированного программного обеспечения [5], в результате определялся коэффициент корреляции результирующих

Таблица 1. Результаты эксперимента

Мощность излучения, мВт	5,09	5,19	5,28	5,38	5,47	5,56	5,66	5,75
Без дефекта								
Коэффициент корреляции	1,000	0,828	0,813	0,799	0,798	0,809	0,813	0,813
Дефект 1								
Коэффициент корреляции	1,000	0,825	0,568	0,567	0,564	0,569	0,557	0,554
Дефект 2								
Коэффициент корреляции	1,000	0,784	0,788	0,551	0,545	0,558	0,562	0,778

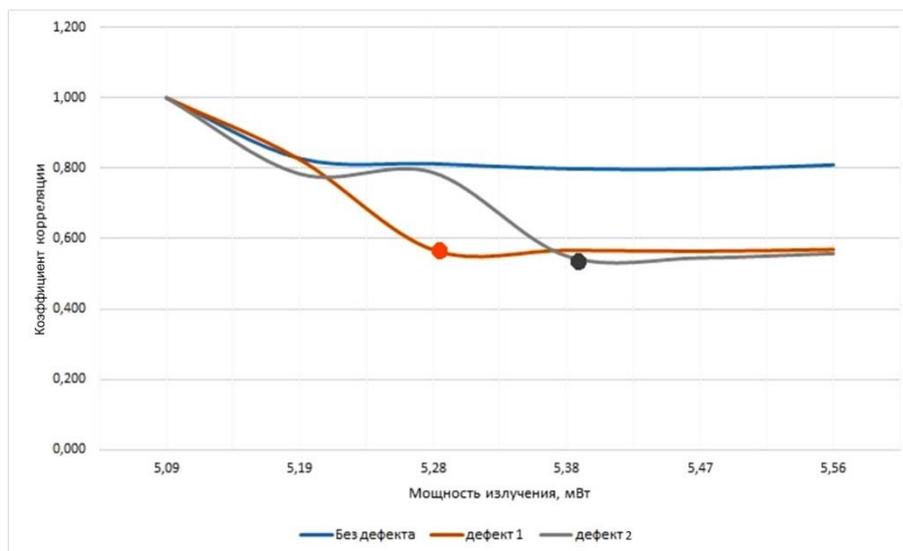


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции от мощности излучения

изображений при начальной мощности  $P_0$  и при соответствующей мощности КИ  $P_n$  представленных в таблице в нижнем ряду.

В результате определения коэффициентов корреляции, полученных результирующих изображений (нижний ряд) при минимальной мощности источника КИ (полное отражение) до мощности при котором излучение полностью проходит сквозь внутреннюю структуру композитного материала, можно определить состояние внутренней структуры объекта на различной глубине.

На основании полученных результатов построен график зависимости коэффициента корреляции результирующих изображений от мощности источника КИ, представленного на рисунке 3.

Таким образом, фиксируя момент резкого уменьшения коэффициента корреляции спекл-изображения при соответствующей мощности и зная коэффициент преломления (поглощения) материала, можно, определить глубину залегания дефекта во внутренней структуре композитного материала.

#### Список источников

- [1] **Воробей, В. В.** Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова / В. В. Воробей, В. Б. Маркин. — Барнаул, 2006. — 189 с.
- [2] **Павлов, П. В.** Контроль композитных материалов с применением вихревых лазерных пучков / П. В. Павлов, Н. В. Петров, А. Е. Горюнов, А. Н. Малов // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2015. — Том 58. — № 11–3. — С. 179–183.
- [3] **Горюнов, А. Е.** Неразрушающий контроль композитных материалов по анализу параметров цифровой спекл-фотографии / А. Е. Горюнов, П. В. Павлов, Н. В. Петров // Труды военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. — 2014. — № 645. — С. 132–135.
- [4] **Патент № 2 563 334 РФ.** Способ неразрушающего контроля подповерхностной структуры полупрозрачных объектов. — № 2014 125 647; заяв. 24.06.14; опубл. 20.09.15, Бюл. № 26. — 7 с.
- [5] **Свидетельство № 2017 614 411 РФ.** Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс неразрушающего контроля на основе анализа цифровых спекл-фотографий методом «шахматной доски». / П. В. Павлов, А. Н. И. С. Лагошный, А. Н. Малов, А. В. Неупокоева, И. Э. Вольф, М. О. Астахов; заявитель и правообладатель ВУНЦ ВВС «ВВА» (Воронеж, РФ). — № 2017 611 428; заявл. 20.03.2017; опубл. 14.04.2017, реестр программ для ЭВМ. — 1 с.

## **A composit materials internal structure diagnostics by means of the speckle-photos analysis of its digital parameters**

*A. N. Malov<sup>1</sup>, P. V. Pavlov<sup>2</sup>, M. O. Astakhov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin», Voronezh, Russia

Ways of none destructed testing of details from composit materials with use of a method of speckle-structures of laser diodes optical radiation are considered. Results of experimental definition of a defect localization depth in internal structure of details from composit materials on parameters of digital speckle-photos are presented.

**Keywords:** Correlation, Speckle, None destructed testing, Diagnostics, Composite, Laser.

## 6.6. Исследование паразитных акустических резонансов интегрально-оптических модуляторов методами голографической интерферометрии

А. В. Варламов<sup>1,2</sup>, М. Ю. Плотников<sup>3</sup>, А. С. Алейник<sup>3</sup>, П. М. Агрузов<sup>1</sup>, И. В. Ильичев<sup>1</sup>, А. В. Шамрай<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Акустические колебания в интегральных электрооптических модуляторах оказывают паразитное влияние на оптический сигнал. Для визуализации пространственного распределения акустических колебаний был использован метод адаптивной интерферометрии с использованием фотоприемника на основе нестационарной фотоЭДС. Результаты измерений хорошо согласуются с численным моделированием. На основе пространственных распределений акустических колебаний предложены методы их подавления: нанесение дополнительных электродов, изменение формы подложки.

**Ключевые слова:** Оптика, Голографическая интерферометрия, Интегральные электрооптические модуляторы.

### Введение

Интегрально-оптические модуляторы на подложках ниобата лития широко используются в оптических телекоммуникациях [1]. Возбуждение акустических колебаний и их влияние на оптические сигналы в таких системах пренебрежимо мало и лежит вне высокочастотного диапазона ( $> 10$  ГГц) передаваемых цифровых сигналов. Однако в последнее время значительно возрос интерес к волоконно-оптическим системам с аналоговыми оптическими сигналами и аналоговой модуляцией. Это системы опроса и предварительной обработки сигналов волоконно-оптических датчиков [2] и радиодатонные системы генерации, передачи и обработки аналоговых СВЧ сигналов [3, 4]. Здесь акустические воздействия даже на относительно низких частотах до 1 ГГц могут приводить к значительному росту шумов и возникновению паразитных сигналов-артефактов. Ниобат лития обладает целым набором эффектов [5]: электрооптический, акустооптический, пьезоэлектрический, фотоупругий, нелинейные оптические эффекты, что открывает различные возможности сложного нелинейного взаимодействия оптического сигнала и акустических колебаний. Это может приводить к сложным нелинейным взаимодействиям оптического сигнала и возбуждаемых акустических колебаний. В связи с этим имелась необходимость исследования процессов возбуждения акустических колебаний и их влияния на оптические сигналы в интегральных электрооптических модуляторах на подложках ниобата лития. Это было осуществлено в данной работе.

### Исследование

Вначале были проведены исследования чипа фазового модулятора на основе прямого канального оптического волновода и низкочастотного интегрально-оптического модулятора для волоконно-оптического гироскопа, представляющий собой волноводный оптический делитель и два фазовых модулятора, работающие в противофазе (их вид показан на рисунке 1). Результаты этого исследования были представлены на конференции [6].

Затем были проведены исследования низкочастотного интегрально-оптического модулятора более новой конфигурации (показан на рисунке 2).

Для экспериментального исследования пространственного распределения амплитуды колебаний был применен метод адаптивной интерферометрии с использованием фотоприемника на основе нестационарной фотоЭДС [7]. Высокая чувствительность данного метода позволяет регистрировать колебания поверхности с амплитудой в несколько десятков пикометров. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.

В качестве источника излучения в адаптивном интерферометре использовался непрерывный лазер на второй гармонике неодима (Nd: YAG, 532 нм, 200 мВт). Предметный луч отражался от поверхности чипа модулятора, при этом колебания поверхности приводили к фазовой модуляции предметного луча, сдвигу интерференционной картины и возникновению нестационарной фотоЭДС на адаптивном фотоприемнике, которая

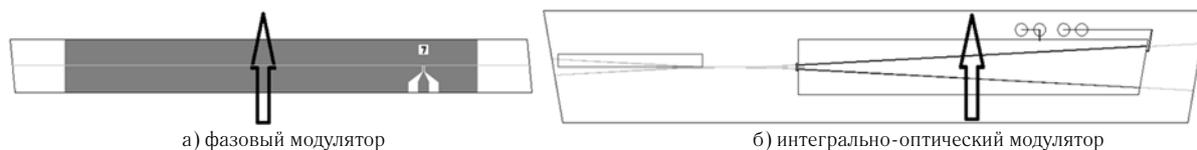


Рис. 1. Виды исследовавшихся модуляторов, стрелки схематично показывают направление сканирования лучом

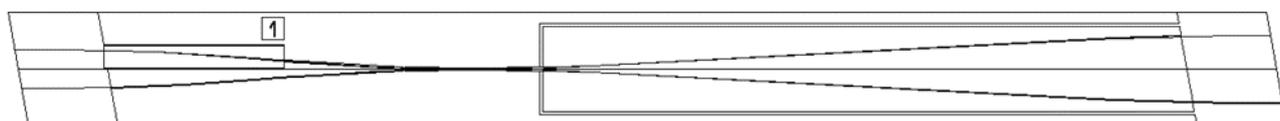
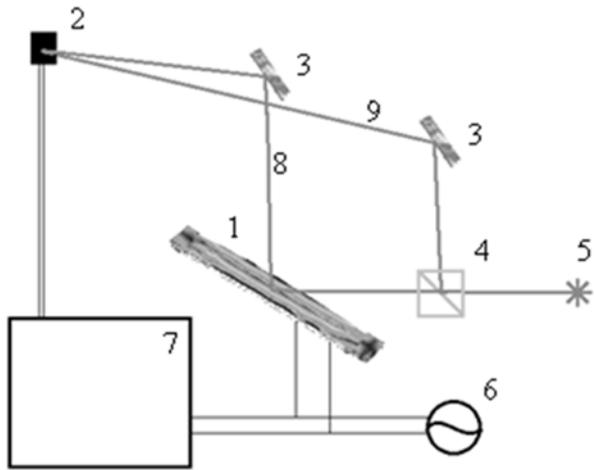


Рис. 2. Вид низкочастотного интегрально-оптического модулятора новой конфигурации



1 — модулятор (также показана результирующая огибающая амплитуд колебаний его поверхности); 2 — кристалл GaAs; 3 — зеркала; 4 — светоделительный куб; 5 — лазер с длиной волны 532 нм и выходной мощностью 200 мВт; 6, 7 — сопряженные генератор и селективный нановольтметр; 8, 9 — предметный и опорный лучи  
Рис. 3. Измерительная установка

регистрировалась селективным нано-вольтметром. Сканирование предметным лучом вдоль поверхности образца позволяло получить картину пространственного распределения амплитуды акустических колебаний. Амплитуда колебаний поверхности вычислялась из амплитуды сигнала нестационарной фотоЭДС с использованием калибровки адаптивного интерферометра по отклику на фазовую модуляцию опорного луча при помощи ячейки Поккельса с известным полуволновым напряжением.

Также для апробации исследования использовалось численное моделирование с использованием метода конечных элементов.

Было показано, что в диапазоне частот до 1 МГц, характерном для работы модуляторов в составе систем обработки сигналов волоконно-оптических датчиков, происходит эффективное возбуждение акустических колебаний, которое носит резонансный характер. Резонансные частоты согласуются с собственными акустическими модами кристаллической подложки модулятора, что подтверждается результатами математического моделирования. Данные резонансы оказывают существенное влияние на оптический сигнал. Влияние оказывается как за счет изменения электрических, так

и за счет изменения оптических характеристик модулятора. На рисунках 4а, 4б и 4в показаны пространственные зависимости амплитуды акустических колебаний, которые были получены с помощью метода нестационарной фотоЭДС для трёх резонансных частот при сканировании в направлении перпендикулярном направлению волноводов (направление сканирования на рисунке 1). Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

На основе пространственных распределений акустических колебаний предложены методы их подавления: нанесение дополнительных электродов, изменение формы подложки. Дополнительные электроды наносятся на модулятор так, чтобы создавать колебание в противофазе к исходному. На рисунке 5 показаны АЧХ полной проводимости, демонстрирующие эффект от нанесения дополнительных электродов. АЧХ были получены с помощью компьютерного моделирования.

Наблюдалось значительное уменьшение уровня резонансных акустических колебаний на отдельных частотах. Таким образом, можно говорить о высокой эффективности подавления акустических резонансов в узкой полосе частот. В то же время, на частотах вне области подавления, напротив, происходит усиление резонансов.

Акустические резонансы в модуляторе возникают на частотах, при которых ширина модулятора кратна длине стоячей акустической волны. Исходя из этого, была также предложена конфигурация с расходящимися под углом  $6^\circ$  волноводами фазовых модуляторов и подложкой со скошенными боковыми гранями так, чтобы исключить возникновение резонансов, при которых межэлектродные зазоры попадают в пучности стоячей акустической волны. АЧХ полной проводимости, полученные с помощью компьютерного моделирования до и после осуществления вырезов показаны на рисунке 6.

В данном случае наблюдалось значительное подавление резонансных акустических колебаний в широком диапазоне частот.

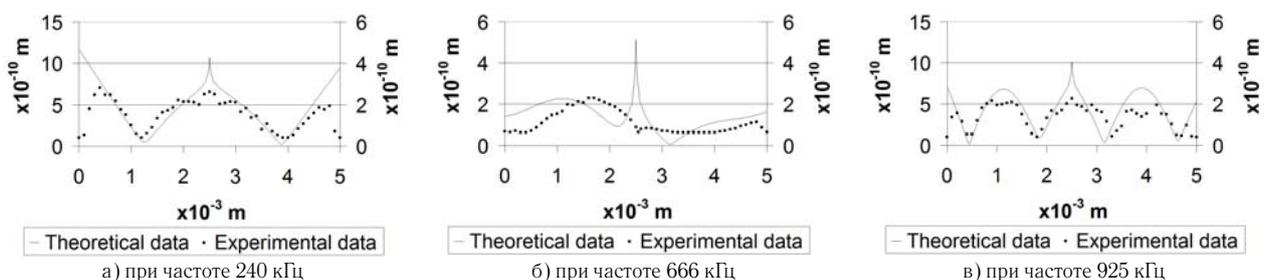
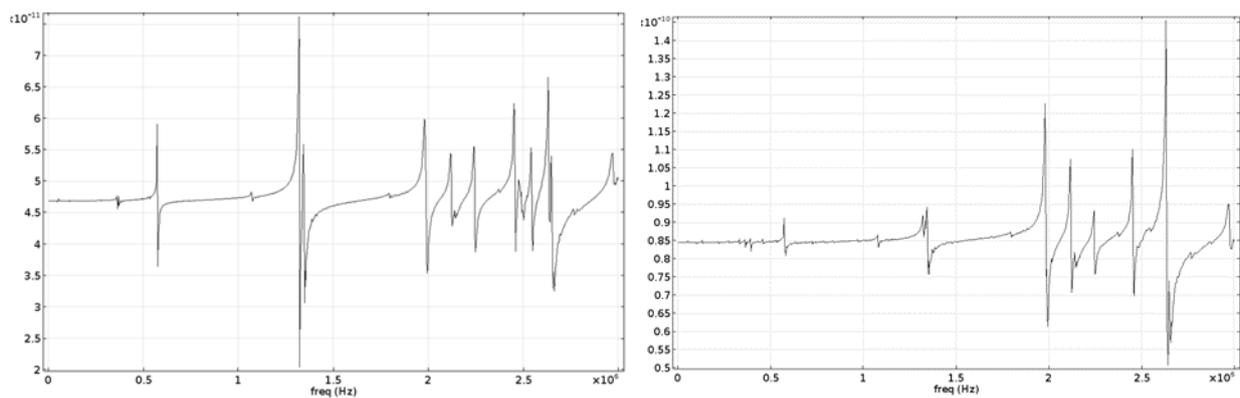


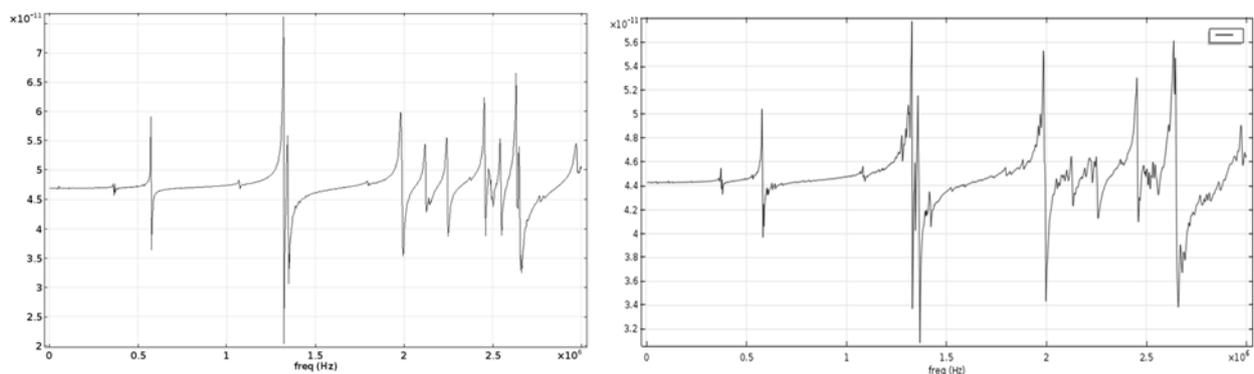
Рис. 4. Пространственные распределения амплитуд колебаний для фазового модулятора, полученные с помощью компьютерного моделирования и экспериментально при различных частотах резонансного возбуждения



а) до нанесения дополнительных электродов

б) после нанесения дополнительных электродов

Рис. 5. АЧХ полной проводимости, полученные с помощью компьютерного моделирования



а) до осуществления вырезов

б) после осуществления вырезов

Рис. 6. АЧХ полной проводимости, полученные с помощью компьютерного моделирования

### Заключение

Метод адаптивной интерферометрии с использованием фотоприемника на основе нестационарной фотоЭДС был применен для исследования паразитных акустических колебаний в интегральных электрооптических модуляторах. Были получены пространственные распределения амплитуд колебаний. Численное

моделирование с использованием метода конечных элементов показало хорошее соответствие результатов с данными, полученными при помощи метода адаптивной интерферометрии. Были продемонстрированы методы подавления акустических колебаний: нанесение дополнительных электродов, изменение формы подложки.

### Список источников

- [1] **Chen, E.** Broadband optical modulators: science, technology, and applications / E. Chen, A. Murphy. — CRC press, 2011.
- [2] **Kirkendall, C. K.** Overview of high performance fibre-optic sensing / C. K. Kirkendall, A. Dandridge // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2004. — Vol. 37. — № 18. — P. 197.
- [3] **Urlick, V. J.** Fundamentals of microwave photonics / V. J. Urlick, K. J. Williams, J. D. McKinney. — John Wiley & Sons, 2015. — № 1.
- [4] **Cox, C. H.** Analog optical links: theory and practice / C. H. Cox. — Cambridge University Press, 2006.
- [5] **Bazzan, M.** Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications / M. Bazzan, C. Sada // Applied Physics Reviews. — 2015. — Vol. 2. — №. 4. — С. 040603.
- [6] **Варламов, А. В.** Акустические колебания в интегрально-оптических модуляторах на основе ниобата лития / А. В. Варламов, П. М. Агрузов, И. В. Ильичев, А. В. Шамрай — Сборник трудов IX Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2016». Санкт-Петербург. 17–21 октября 2016; Под ред. проф. В. Г. Беспалова, проф. С. А. Козлова. — СПб: Университет ИТМО, 2016. — 537 с.
- [7] **Stepanov, S. I.** Measuring vibration amplitudes in the picometer range using moving light gratings in photoconductive GaAs:Cr / S. I. Stepanov, I. A. Sokolov, G. S. Trofimov, V. I. Vlad, D. Popa, I. Apostol // Optics Letters. — 1990. — 15. — P. 1239–1241.

## Investigation of parasitic acoustic resonances of integrated electro-optic modulators using holographic interferometry

*A.V. Varlamov<sup>1,2</sup>, M.Y. Plotnikov<sup>3</sup>, A.S. Aleynik<sup>3</sup>, P.M. Agruzov<sup>1</sup>, I.V. Il'ichev<sup>1</sup>, A.V. Shamray<sup>1,2,3</sup>*

<sup>1</sup> Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

Acoustic vibrations in integrated electro-optic modulators have a parasitic effect on the optical signal. To visualize the spatial distribution of acoustic vibrations, the method of an adaptive interferometry using a photo receiver based on a nonstationary photoelectric power has been used. The results of the measurements are in good agreement with the numerical simulation. On the basis of spatial distributions of acoustic vibrations, the methods for its suppression have been proposed: the deposition of additional electrodes, the modification of shape of substrate.

**Keywords:** Optics, Holographic interferometry, Integrated electro-optic modulator.

### 6.7. Применение цифровой спекл-интерферометрии для узловой отработки конструкционной прочности деталей турбомашин

А. И. Жужукин

ПАО «Кузнецов», Самара, Россия

При создании современных газотурбинных двигателей (ГТД) одной из основных проблем является обеспечение требуемой вибропрочности лопаток турбины и компрессора. В связи с этим возникает задача в исследовании вибрационных характеристик деталей и узлов ГТД. В настоящее время во многих случаях она может быть решена с привлечением численных методов, в первую очередь с помощью метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе ANSYS. Однако при этом всегда возникает вопрос, насколько точно расчётная модель отображает поведение реального объекта. Поэтому на практике расчётные методы применяют совместно с экспериментальными, в частности методами голографической интерферометрии или, что в большей степени соответствует современным экономическим реалиям, методами цифровой спекл-интерферометрии.

И если для определения вибрационных характеристик лопаток компрессора и турбины в настоящее время голографические и спекл-интерферометрические установки уже созданы [1–3], то для исследования таких крупногабаритных объектов, как лопатки вентилятора, приходится преодолевать экспериментальные трудности. В то же время к вентиляторам современных авиационных двигателей предъявляются высокие требования по уровню аэродинамических характеристик, по общей массе, допустимому уровню шума. Чтобы отвечать всё возрастающим требованиям, конструкторы двигателей стремятся увеличить расход воздуха через вентилятор, увеличивая его диаметр. Необходимость изменения диаметра вентилятора приводит к увеличению массы лопаток, что в свою очередь напрямую влияет на увеличение массы как роторных, так и статорных деталей. В этой связи «облегченная» лопатка вентилятора становится ключевым элементом конструкции двигателя нового поколения, которая позволит снизить общую массу двигателя.

На ПАО «Кузнецов» разработана рабочая лопатка вентилятора — титановая, полой конструкции, с экономией по массе до 30 %. Внутри лопатки находится гофрированный наполнитель, образующий ребра жёсткости соединённый сваркой давлением с обшивками со стороны корыта и спинки. Спинка и корыто переменной толщины по высоте. Технология изготовления таких лопаток достаточно сложна и возникает необходимость в проведении неразрушающего контроля качества их изготовления. При этом используется метод цифровой спекл-интерферометрии.

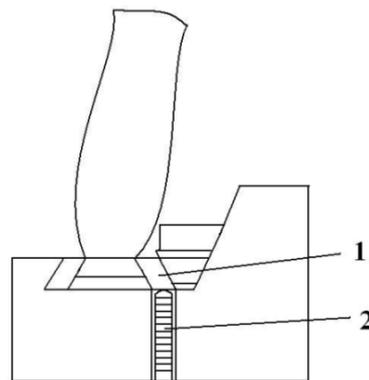
Для выявления собственных частот применяется бесконтактный метод возбуждения лопатки волновой деформацией (рисунк 1).

Синусоидальный электрический сигнал на пьезовозбудитель 2 подаётся с генератора. При использовании этого метода возбудитель не влияет на собственные частоты и не искажает форму колебаний лопатки. Исключается пропуск отдельных форм, который возможен при контактном способе возбуждения.

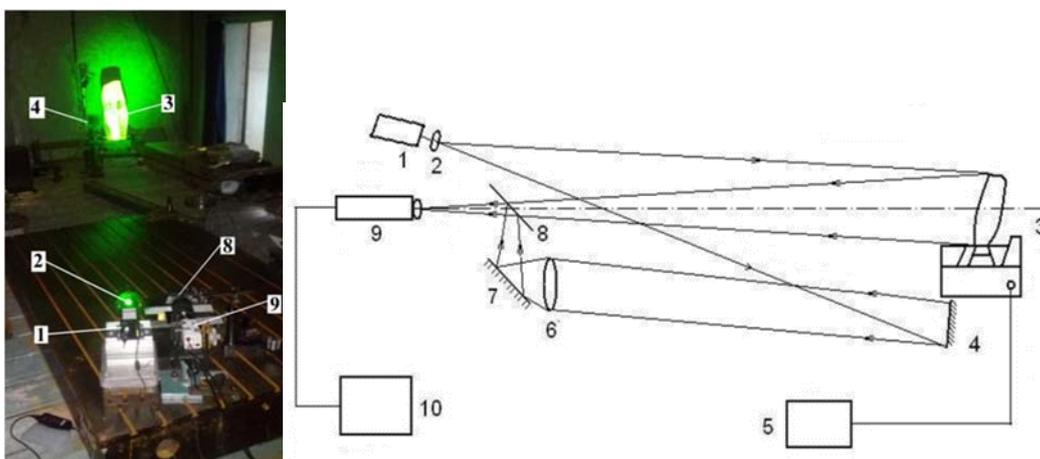
Для исследований вибраций этой крупногабаритной лопатки (длина пера более 70 см) разработан спекл-интерферометр на основе оптической схемы интерферометра с разделёнными ветвями и гладкой опорной волной (рисунок 2). Главной особенностью созданной установки является то, что оптическая схема и исследуемый объект размещены на голографической платформе размером 3 × 5 м, массой 14 т, находящейся на каучуковых подушках. При этом использован принцип разделения пучка по волновому фронту, что вызвано тем обстоятельством, что излучение используемого твердотельного лазера SLM-417-50 имеет горизонтальную поляризацию.

Луч света от лазера 1 расширяется линзой 2 и освещает одновременно исследуемый объект 3 и зеркало 4. Часть лазерного излучения, рассеянная диффузной поверхностью исследуемого объекта 3 (предметный пучок) принимается телекамерой 9. Отражённая от зеркала 4 волна (опорный пучок) проходя через линзу 6, с помощью зеркала 7 и плоскопараллельной пластины 8 направляется на вход телекамеры 9. Таким образом, предметный пучок имеет спекл-структуру, а опорная волна представляет собой гладкий волновой фронт. Обе волны попадают на фоточувствительный слой телекамеры 9, где они интерферируют и дают требуемую интерференционную чувствительность. В этом случае важно, чтобы спеклы имели достаточно большие размеры и могли быть разрешены видеосистемой.

С помощью описываемой установки проведены исследования резонансных колебаний 3-х случайно



1 — зажимные элементы, 2 — пьезоэлектрический возбудитель  
Рис. 1. Схема возбуждения вентиляторной лопатки волновой деформацией



1 — лазер, 2 — расширитель пучка, 3 — исследуемый объект, 4 — зеркало, 5 — генератор, 6 — линза, 7 — поворотное зеркало, 8 — плоскопараллельная пластина, 9 — телекамера, 10 — персональный компьютер

Рис. 2. Общий вид и схема спекл-интерферометра для исследования колебаний пустотелой вентиляторной лопатки

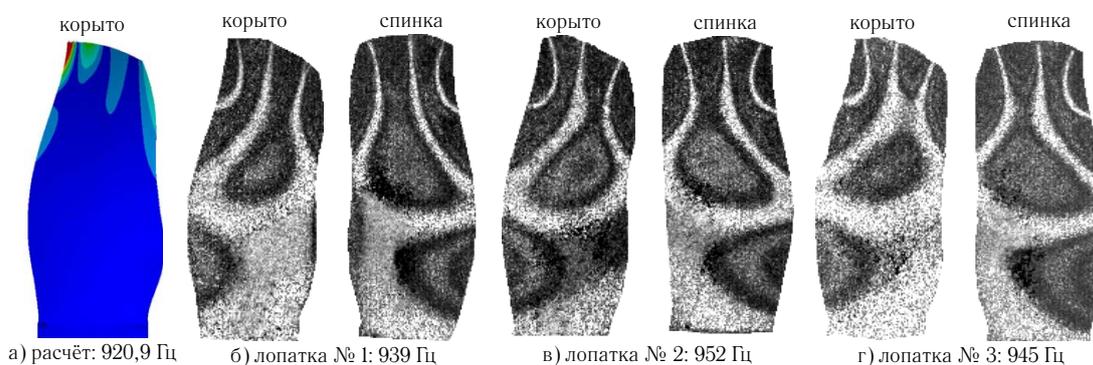


Рис. 3. Высоочастотная форма колебаний 3-х разных пустотелых лопаток вентилятора

Таблица 1

Номер формы колебаний	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Расчёт	61,3	154,8	234,9	388,6	523,1	667,9	732,8	867,9	920,9
Лопатка № 1	54	150	229	378	526	639	709	815	939
Лопатка № 2	54	151	230	380	533	640	711	826	952
Лопатка № 3	55	151	231	382	546	646	709	826	945

выбранных из партии лопаток вентилятора ГТД. Испытания лопаток каждый раз проводилось как со стороны корыта, так и со стороны спинки.

Одним из показателей качества серийного производства лопаток является идентичность форм колебаний и разброс собственных частот.

Анализ полученных данных показывает, что наибольшее относительное отклонение расчётных значений от эксперимента получено по первой форме — около 13 % (54 Гц — эксперимент и 61,3 Гц — расчёт). В связи с этим необходима корректировка расчётной модели.

Для контроля качества изготавливаемых пустотелых лопаток формы колебаний снимались как со стороны корыта, так и со стороны спинки.

В случае отсутствия структурной целостности лопатки на высоких частотах поверхности корыта и спинки могут колебаться независимо. В нашем случае этого обнаружено не было.

Таким образом, с помощью разработанной установки проведены исследования собственных частот и форм колебаний 3-х пустотелых вентиляторных лопаток, в результате чего была установлена необходимость в корректировке численной модели. При этом аномальных зон независимых колебаний корыта и спинки на лопатках обнаружено не было.

#### Список источников

- [1] Макаева, Р. Х. Голографическая интерферометрия при конструкторской доводке лопаток компрессора ГТД / Р. Х. Макаева, М. Г. Хабибуллин, А. Х. Каримов // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. — 1999. — № 2. — С. 72—74.

- [2] **Ткач, М. Р.** Определение форм собственных колебаний элементов ГТД в реальном времени методом электронной спекл-интерферометрии / М. Р. Ткач, Ю. Г. Золотой, Д. В. Довгань // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2013. — Том 85. — № 9. — С. 203–207.
- [3] **Жужукин, А. И.** Спекл-интерферометр для панорамного исследования колебаний турбинных лопаток / А. И. Жужукин, В. А. Соляников // *Известия Самарского научного центра РАН*. — 2012. — Том 14. — № 6. — С. 59–62.

## **Digital speckle interferometry application for turbo-machinery structural strength component development**

*A. I. Zhuzhukin*

Kuznetsov, Samara, Russia

A speckle interferometry setup with the optical circuit based upon the speckle interferometer featuring split branches and smooth reference wave is developed for investigating vibrations of a large-size hollow fan blade. The validity of the blade computational model is verified. The obtained high-frequency vibration modes are used for conducting the analysis of blade manufacturing quality.

## 6.8. Многочастотный активный нелинейный резонатор на основе самоаффинного рельефа

Г. Н. Лукьянов<sup>1</sup>, И. Н. Серов<sup>2</sup>, А. В. Копыльцов<sup>3</sup>, В. Т. Барченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Фонд «Айрес», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Свойства поверхности отличаются от свойств кристалла в объеме и формирование на ней каких-то топологических особенностей открывает неожиданные возможности для создания твердотельных элементов принципиально нового типа. Рассмотрено применение устройства с самоаффинным рельефом на поверхности. Продемонстрировано возникновение многочастотного резонансного отклика над поверхностью устройства.

**Ключевые слова:** Самоаффинный рельеф, Резонансный отклик, Динамическое равновесие, Синхронизация.

### Введение

Регулярные структуры широко используются в оптике (дифракционные решетки, дифракционные оптические элементы), радиофизике и радиотехнике. Так, основой любой антенны являются регулярно расположенные в пространстве проводящие и диэлектрические устройства. Как правило, их особенностью является то, что они используют при функционировании такие явления, как пропускание, преломление, отражение, интерференция, дифракция и не являются самостоятельными источниками излучения. Самоаффинный поверхностный рельеф на поверхности поляризуемого электрическим полем материала позволяет получить устройство, отвечающее многочастотным откликом на любое внешнее воздействие электромагнитной волной [1]. Спектр этого отклика задается рельефом поверхности и не зависит от спектра воздействующего сигнала [2, 3].

### Предмет исследования

Исследовалось взаимодействие разных видов излучения с устройствами с самоаффинным рельефом на поверхности: на основе кремниевой пластины (резонатор «АЙРЭС», [1]); на основе стеклотекстолита.

Поверхность резонаторов «АЙРЭС» изготовлена в виде криволинейных щелей (каналов), рисунок которых подчиняется законам самоподобия и масштабной инвариантности и выполнен на основе аффинных преобразований, т. е., эта поверхность является самоаффинной по построению [1]. Резонатор «АЙРЭС» изготавливается на кремниевой подложке (диаметр подложки 6 мм, толщина 1 мм), на поверхности которой сформирована сложная система кольцевых каналов прямоугольного сечения с шириной 1 мкм и глубиной 1,2 мкм, образующих регулярную самоаффинную структуру (рисунок 1).

Внешний вид устройства из стеклотекстолита представлен на рисунке 2 и принцип построения рисунка поверхности изображен на рисунке 3.

### Моделирование

Моделировалось взаимодействие электромагнитной волны с поверхностью пластины для нестационар-

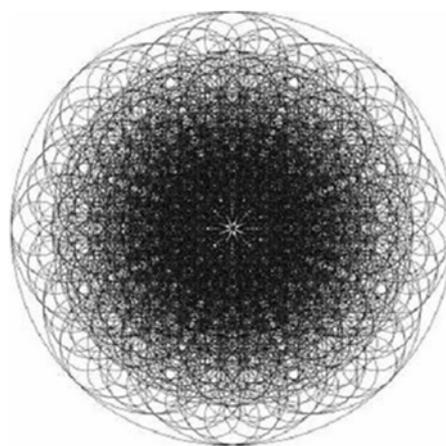


Рис. 1. Резонатор «АЙРЭС»

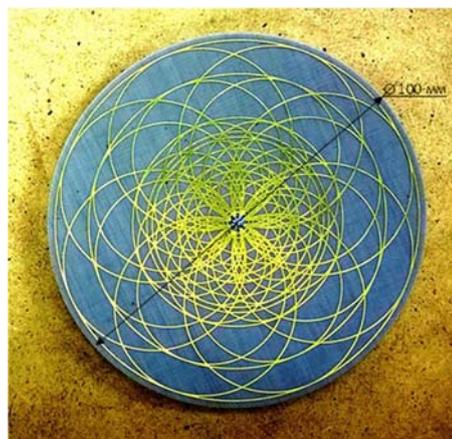


Рис. 2. Устройство с самоаффинным рельефом из стеклотекстолита

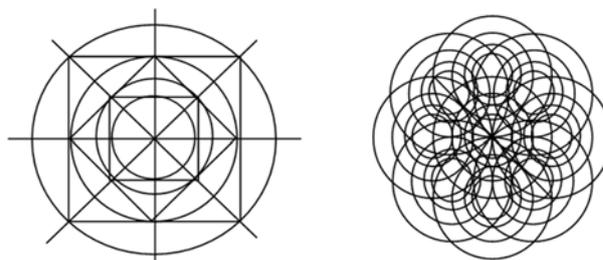


Рис. 3. Принцип построения рисунка поверхности

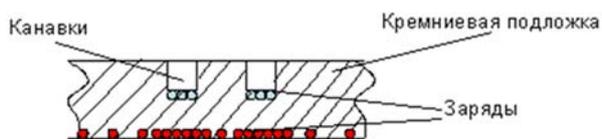


Рис. 4. Качественная картина распределения зарядов

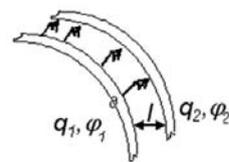


Рис. 5. Заряды в соседних канавках

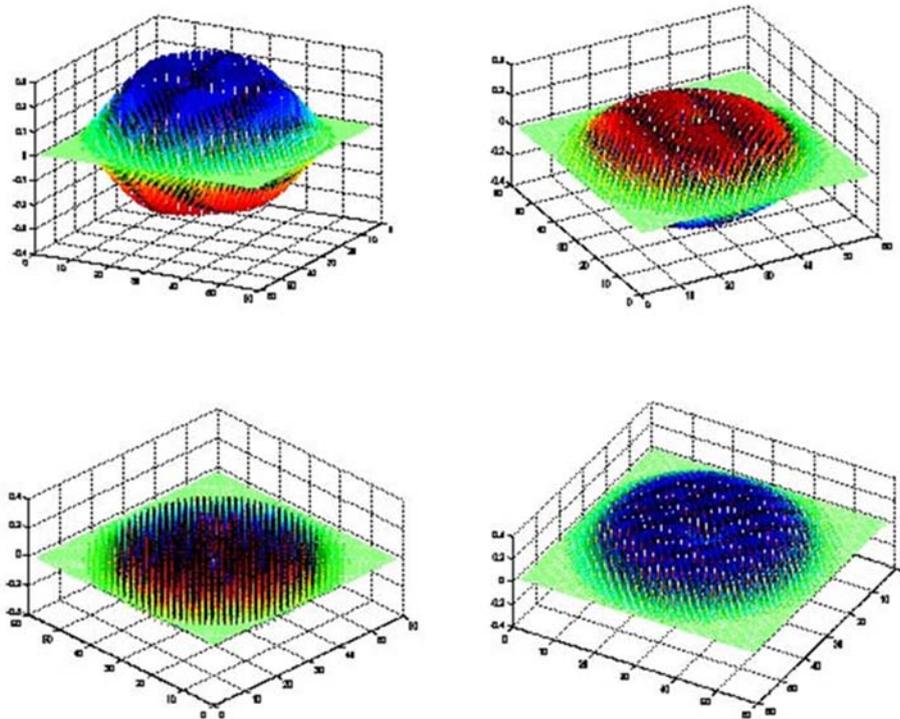


Рис. 6. Распределение напряженности  $E$  по поверхности резонатора, различные проекции

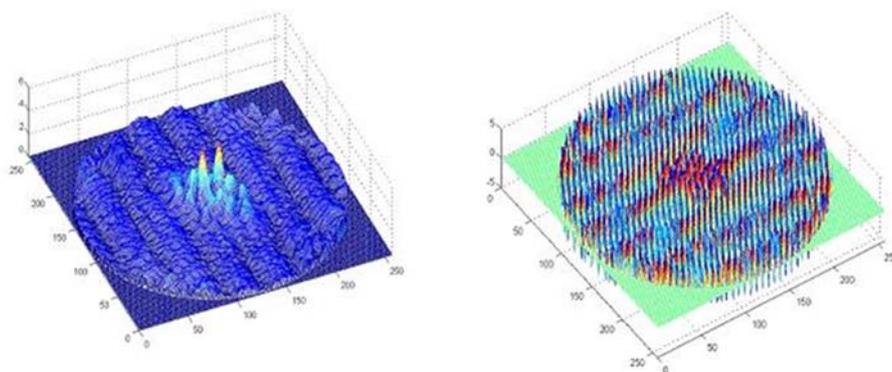


Рис. 7. Распределение интенсивности по поверхности резонатора, Слева — амплитуда, справа — фаза

ного случая, для двумерной модели, т. е. рассматривалось изменение распределения напряженности со временем по поверхности резонатора для различных граничных условий.

Электрическое поле при взаимодействии с полупроводником вызывает явление смещения зарядов и, вследствие того, что в области «канавок» пластина имеет меньшую толщину, концентрация носителей заряда в канавках будет выше, чем в соседних областях. Поэтому при моделировании принималось, что носители заряда сосредотачиваются в канавках (рисунок 4).

Пусть плотность зарядов в двух соседних канавках составляет, соответственно,  $q_1$  и  $q_2$ , а потенциалы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (рисунок 5).

При достижении потенциалом какого-то критического значения  $kr$  возникает пробой по кратчайшему расстоянию между канавками. Математическая модель для данного случая имеет вид:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \right) - aE, \quad (1)$$

где  $D$  и  $a$  — коэффициенты,  $E$  — напряженность электрического поля,  $x$  и  $y$  — координаты,  $t$  — время.

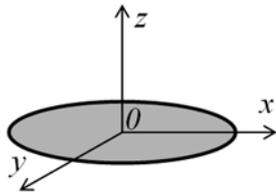


Рис. 8. Ориентация резонатора относительно системы координат

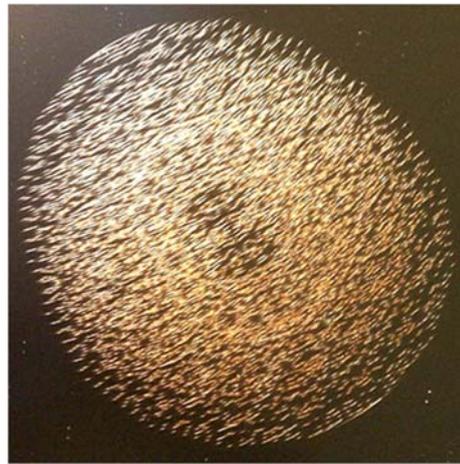
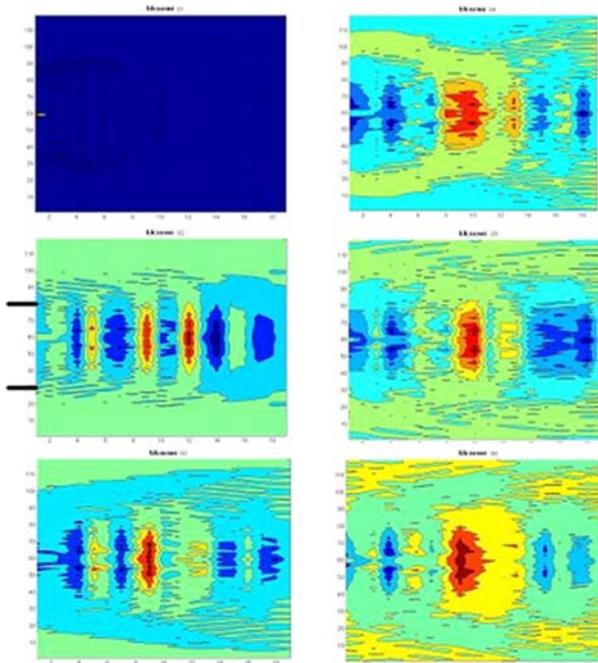


Рис. 9. Фотография резонатора, под облучением галогеновой лампой мощностью 250 Вт



Левый верхний — момент «0», начало процесса; далее сверху вниз и правый столбик также сверху вниз — развитие процесса во времени

Рис. 9. Процесс установления поля над пластиной

Условие пробоя реализовано следующим образом: если  $|E| > 0,6$ , то  $E = 0$ . Расчеты были проведены для случая, когда  $D = 0,01$  и  $a = 0,001$  и в центре пластины имеется сток для зарядов. Моделирование показало, что независимо от условий на границе поверхности, спустя какое-то время ту ст, устанавливается устойчивое и солитоноподобное распределение напряженности электрического поля по поверхности резонатора.

Результаты моделирования приведены на рисунке 6. Для полученных результатов было определено распределение интенсивности по поверхности резонатора. Результаты расчетов приведены на рисунке 7.

Основным результатом моделирования является то, что установившееся решение, независимо от условий на границе является устойчивым и солитоноподобным. Его форма не меняется при изменении граничных условий. Это означает, что самоаффинная поверхность резонатора «АЙРЭС» разлагает излучение таким образом, что результат этого разложения не зависит от характеристик падающего на него излучения.

Также было выполнено моделирование в трехмерном варианте. Рассматривалась модель вида:

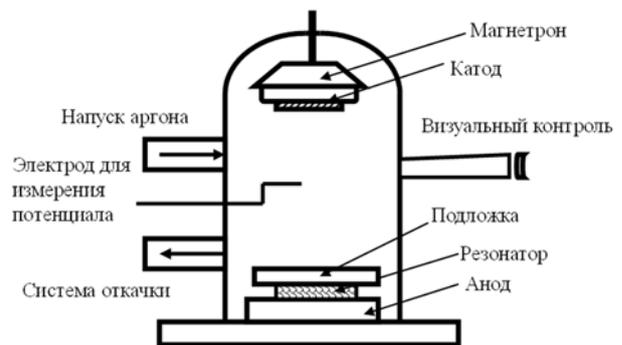


Рис. 10. Установка для магнетронного напыления

$$\frac{\partial E}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right) - aE. \quad (2)$$

От двумерной эта модель формально отличается только наличием третьей пространственной координаты  $z$ . Однако, это позволяет составить более полное представление о взаимодействии резонатора с излучением и получить пространственное распределение напряженности  $E$ . Поверхность резонатора лежит на плоскости  $xOy$ , начало координат в центре резонатора, ось  $z$  перпендикулярна началу координат (рисунок 8.).

Ниже приводятся результаты расчета для развития процесса установления поля над пластиной (рисунок 9).

### Эксперименты

Был выполнен ряд экспериментов с воздействием на резонатор разными длинами волн различной природы: в видимой области оптического спектра; в ВЧ и СВЧ радиодиапазонах; в электромагнитном поле под колпаком установки для магнетронного распыления.

На рисунке 10 представлена фотография резонатора, при облучении его галогеновой лампой мощностью 250 Вт.

Интересные результаты получились при помещении резонатора в установку для магнетронного напыления (рисунок 10). Резонатор располагался между анодом и подложкой.

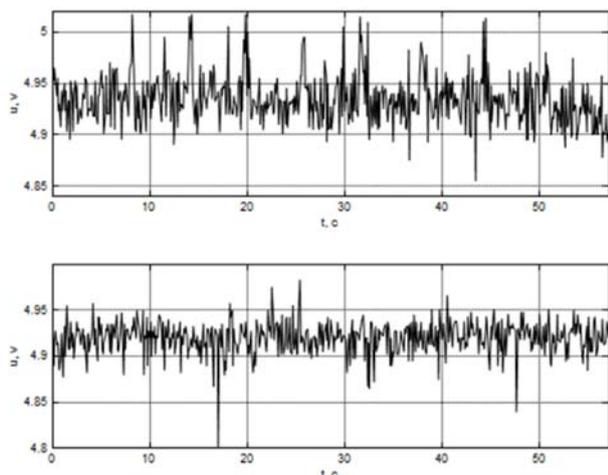
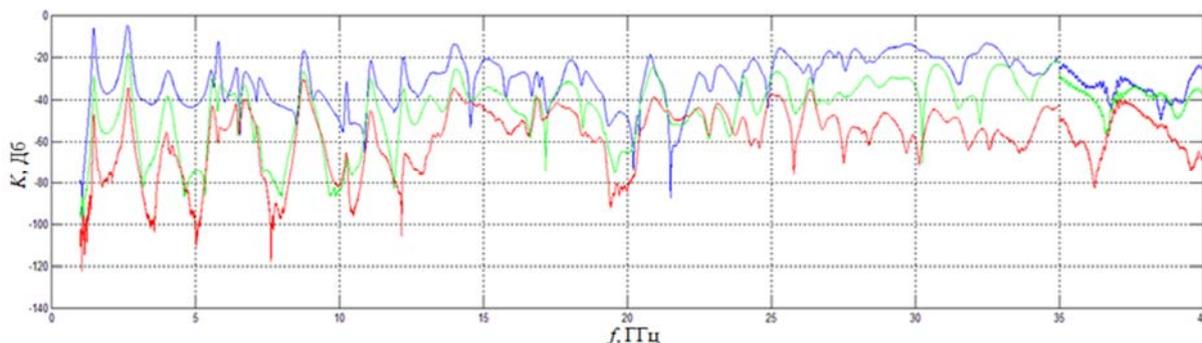


Рис. 11. Колебания потенциала на зонде под колпаком в установке для магнетронного напыления. Верхний рис. - без резонатора, нижний с резонатором

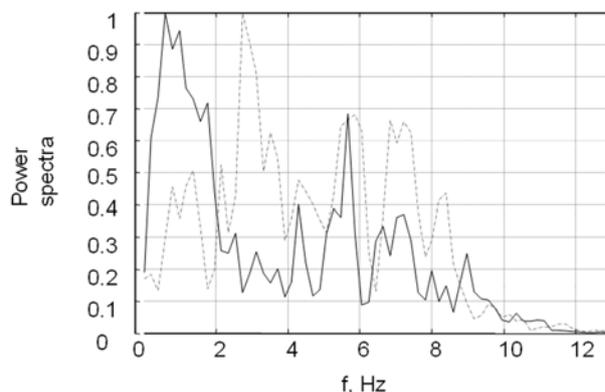
Магнетронное напыление металлических пленок на диэлектрическую или полупроводниковую поверхность происходит под действием сил, имеющих электромагнитную и тепловую природу. Оказалось, что при разности потенциалов постоянного напряжения между катодом и анодом в сотни вольт, электроды, внедренные в установку, показывают колебания потенциалов с амплитудами на уровне единиц вольт. При этом внешний вид этих колебаний различается при наличии и отсутствии резонатора между подложкой и анодом (рисунок 11). Происходит перераспределение энергии в спектре колебаний потенциала (рисунок 12).

Эксперименты проводились с устройством (рисунок 2). Изучалось преобразование частоты, излучаемой генератором поверхностью резонатора. Выполнялось возбуждение частотами 100 кГц, 1 мГц, 3 мГц, 9 мГц, 16 мГц. Результаты в виде фотографий с экрана осциллографа, при одинаковых развертках 0,1 мкс/дел; 20 нс/дел; 2 нс/дел. и масштабе 0,1 В/дел. приведены на рисунке 13.

На осциллограммах хорошо видно, что на любое возбуждение резонатор отвечает своим собственным набором частот, которые не зависят от частоты возбуждения и задаются рисунком на его поверхности [2–4].



Синий — расстояние 1 см, зеленый — 8 см, красный — 40 см  
Рис. 14. Коэффициенты передачи, измеренные на расстояниях между двумя резонаторами



Сплошная линия — резонатор отсутствует, штрихпунктирная — напыление проводится с резонатором  
Рис. 12. Спектральные плотности мощности потенциала на зонде

Были проведены также эксперименты в по определению коэффициента передачи резонатора в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц. Для этого два одинаковых резонатора располагались друг против друга и соединялись кабелями с векторным анализатором. Кабели предварительно тестировались на разных диапазонах, чтобы учесть их собственное влияние.

На рисунке 14 представлены полученные в результате эксперимента коэффициенты передачи, измеренные на расстояниях между двумя резонаторами 1 см, 8 см, 40 см.

### Закключение

Резонатор с самоаффинным поверхностным рельефом, отвечает многочастотным откликом на любое внешнее воздействие электромагнитной волной. Спектр этого отклика задается размерами и рельефом поверхности и не зависит от спектра воздействующего сигнала.

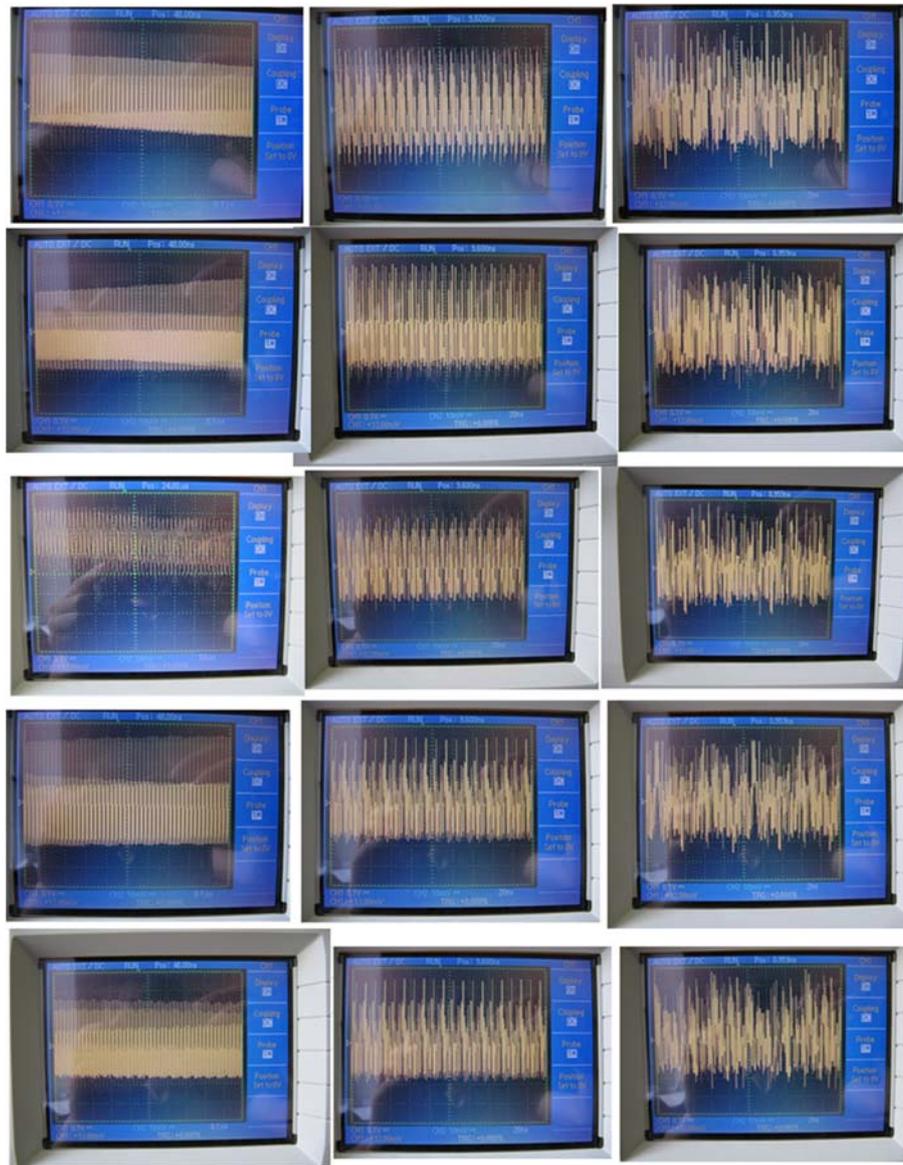


Рис. 13. Результаты возбуждения резонатора частотами 100 кГц, 1 мГц, 3 мГц, 9 мГц, 16 мГц (сверху вниз), при одинаковых развертках 0,1 мкс/дел.; 20 нс/дел.; 2 нс/дел. (слева направо) и масштабе 0,1 В/дел.

#### Список источников

- [1] **Serov, I.** Simulation of interaction of the electromagnetic radiation in the form of surface wave with the solid surfaces / I. Serov, G. Lukyanov // 2005 International Conference Physics and control Proceedings "PhysCon 2005"; IEEE Catalog Number: 05EX1099C, August 24-26, 2005, Saint Petersburg, Russia. — 2005. — P. 781–785.
- [2] **Серов И. Н.** Взаимодействие полупроводниковой пластины с самоаффинным рельефом поверхности с электромагнитным излучением / И. Н. Серов, А. В. Копыльцов, Г. Н. Лукьянов // Нанотехника. — 2006. — № 4 (8). — С. 44–49.
- [3] **Серов И. Н.** Математическое моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с кремниевой самоаффинной поверхностью / И. Н. Серов, А. В. Копыльцов, Г. Н. Лукьянов // Офиц. материалы науч.-практ. конф. «Голография ЭКСПО-2006». — 2006. — С. 102–103
- [4] **Серов И. Н.** Математическое моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с кремниевой самоаффинной поверхностью / И. Н. Серов, Г. Н. Лукьянов, А. В. Копыльцов // Вестник ИНЖЭКОНА, серия: Технические науки. — 2007. — Том 19. — № 6. — С. 199–205.

## **Multi-frequency active nonlinear resonator based on self-affine relief**

*G. N. Lukyanov<sup>1</sup>, I. N. Serov<sup>2</sup>, A. V. Kopyltsov<sup>3</sup>, V. T. Barchenko<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Aires Foundation, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia

The properties of the surface differ from the properties of the crystal in the volume and the formation on it of some kind of topological features gives unexpected possibilities for the creation of solid-state elements of a fundamentally new type. The application of the device with a self-affine relief on the surface is considered. The occurrence of a multifrequency resonant response above the surface of the device is demonstrated.

**Keywords:** Self-affine relief, Resonance response, Dynamic equilibrium, Synchronization.

*Научное издание*

Голография. Наука и Практика

XIV Международная Конференция  
HOLOEXPO 2017

Тезисы докладов

Ответственный редактор А. Ю. Жердев  
Редакторы: Я. А. Град, Л. А. Найдён

Подписано в печать 25.07.2017  
Красногорский завод имени С. А. Зверева  
Академия «Контенант»  
143403, Московская область  
Красногорск, Речная, 8  
Формат 60 × 90 1/8. Бумага офсетная  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 35  
Тираж 120 экз. Заказ № 1076

МГТУ им. Н. Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5с1  
[www.holoexpo.ru](http://www.holoexpo.ru)