Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Общество с ограниченной ответсвенностью «Микро и наноголографические системы»

Голография. Наука и Практика

XIII Международная Конференция ГолоЭкспо 2016

12–15 сентября 2016 г. Ярославль, Россия

Тезисы докладов

Holography. Science and Practice

XIII International Conference HoloExpo 2016

12–15 September 2016 Yaroslavl, Russia

Proceedings

Москва
2016

УДК 681.7+004.315.7+535.317.1
ББК 22.343.4
Г60

Ответственный редактор А.Ю. Жердев

Г60 **Голография. Наука и практика**: XIII 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. — 413 с.

ISBN 978-5-7038-4535-6

Представлены тезисы докладов, составленных на основе докладов XIII международной конференции «Голография. Наука и практика» (12–15 сентября 2016 г., Ярославль, Россия), по следующим тематикам: технологии в области защитных голограмм, формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики и голографических систем, объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии, голограммные и дифракционные оптические элементы: методы компьютерного синтеза, метаматериалы, плазмонные структуры и технология изготовления, голографическая интерферометрия, голографическая память, оптико-голографическая обработка информации.

Издаётся в авторской редакции

ISBN 978-5-7038-4535-6

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016
© ООО «МНГС», 2016

Организаторы конференции:

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. 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), АО «НПО Государственный институт прикладной оптики» (Казань, Россия), ООО «Регула» (Минск, Беларусь), Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева (Самара, Россия), ООО «Микро и наноголографические системы» (Москва, Россия)

Устроитель конференции —
ООО «Микро и наноголографические системы»,
Москва, Россия

Генеральный спонсор —
АО «Научно-производственное объединение «Криптен»,
Дубна, Россия

Спонсоры конференции:
- ЗАО «Голографическая индустрия»,
Минск, Беларусь
- ООО «Хологрэйт»,
Санкт-Петербург, Россия
- ФГУП «Научно-технический центр «Атлас»,
Москва, Россия
- ООО «Регула»,
Минск, Беларусь
- ООО «Микро и наноголографические системы»,
Москва, Россия
- АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

Информационные спонсоры:
- Журнал «Водяной Знак»,
Санкт-Петербург, Россия
- Журнал «Мир техники кино»,
Москва, Россия
- Журнал «Фотоника»,
Москва, Россия

Конференция проводится при поддержке:

- Министерства образования и науки РФ, департамента науки и технологий
- ведущих университетов и научно-исследовательских институтов России: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Санкт-Петербургский государственный национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербургский физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Московский государственный

университет им. М.В. Ломоносова (МГУ им. М.В. Ломоносова), Российский университет дружбы народов (РУДН, Москва, Россия), Самарский государственный аэрокосмический университета им. С.П. Королева (СГАУ им. С.П. Королева), Самарский институт систем обработки изображения РАН, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (КНИТУ–КАИ), Общество «Контенант» (Красногорск) и др.

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

- ведущих университетов и предприятий 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.

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

- Международной Ассоциации Производителей Голограмм (IHMA) в лице директора по выставкам Микаэла Сидорова (Лондон, Англия).

Список секций конференции

На конференции предлагаются к обсуждению научно-технические проблемы и вопросы по следующим секциям:

Секция №1 Технологии в области защитных голограмм

Секция №2 Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики

Секция №3 Объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии

Секция №4 Голограммные и дифракционные оптические элементы: методы компьютерного синтеза, метаматериалы, плазмонные структуры и технологии изготовления

Секция №5 Голографическая интерферометрия, голографическая память, оптико-голографическая обработка информации

Содержание

Пленарное заседание

П.1 Достижения в области голографии на территории бывшего Советского Союза. *Л.В. Танин, В.А. Танин* 13

П.2 Голография сейчас — состояние индустрии. *М. Сидоров* 23

П.3 Перспективы применения голограммных элементов для юстировки неосевых оптических систем. *Б.Н. Сеник, Ю.П. Дорошина, С.Б. Одиноков* 24

П.4 Последние достижения в области электроннолучевой технологии изготовления оригиналов оптических защитных элементов. *А.А. Гончарский, А.В. Гончарский* 28

П.5 Перспективы получения новых визуальных эффектов в защитных голограммах с помощью наноплазмонных структур и возможность их встраивания в традиционную серийную тонкопленочную технологию. *С.Б. Одиноков, А.Ю. Жердев, Д.С. Лушников, М.В. Шишова, А.В. Смирнов, Б.В. Акимов* 30

П.6 Составные объективы из квазидифракционных линз. *Р.В. Скиданов, Н.Л. Казанский, А.А. Морозов, С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский* 39

П.7 Интерферометрические методы контроля сферической, асферической и нетипичной оптики с применением синтезированных голограмм. *А.Г. Полещук, Р.К. Насыров* 44

П.8 Круговая делительная техника АО «НПО «ГИПО»: современное состояние, проблемы и перспективы. *А.В. Лукин, А.Н. Мельников, Ю.П. Чугунов, А.П. Демин, Ю.Е. Семенов* 49

П.9 Применение цифровой голографии в голографической интерферометрии. *В.Ю. Венедиктов, Д.В. Венедиктов, С.А. Пулькин, А.А. Севрюгин, И.М. Турсунов* 52

П.10 Методы увеличения разрешающей способности и глубины резкости синтезированных голограмм-проекторов. *С.Н. Корешев, О.В. Никаноров, М.А. Фролова, Я.А. Новицкая* 55

П.11 Особенности использования PSM-метода при расчете дифракционной эффективности толстых отражательных голограмм. *Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов, К.Н. Афанасьев, А.С. Бородулин* 60

П.12 Новые фото-термо-рефрактивные стекла для записи объемных голограмм: свойства, технологии и применения. *Н.В. Никоноров* 68

П.13 Система интерференционной литографии с прямой лазерной записью на слое аморфного кремния. *А.А. Кутанов, А.Г. Полещук, И.А. Снимщиков, Н. Сыдык уулу* 71

П.14 Техника, алгоритмы и особенности широкопольной и сканирующей голографической микроскопии. *Ю.Н. Захаров* 75

Устные доклады

Секция №1
Технологии в области защитных голограмм

1.1 Поиск контрастных плоских изображений объектов востановленных из цифровых голограмм методом минимизации энтропии. *Ч.Б. Кайтуков, В.А. Киселев, А.В. Яновский* 83

1.2 Программное обеспечение «RainBow» для получения полноцветных изображений в защитных голограммах, OVD-структур и микро-нанооптических элементов с помощью электронно-лучевой литографии и лазерной аппаратуры Dot-Matrix-DLW. *А.А. Свинцов, С.И. Зайцев* 89

1.3 Эффективные публичные признаки защитных голограмм. *С. Захаровас, Р. Баканас, А. Булановс, В. Варадараджан* 91

1.4 Формирование микро- и наноструктур для оптики с использованием нового электронно-литографического принципа. *М.А. Брук, Е.Н. Жихарев, А.Е. Рогожин, Д.Р. Стрельцов, А.В. Спирин* 100

1.5 Метод контроля качества защитных голограмм на основе косвенного измерения периода и глубины поверхностного микрорельефа. *В.В. Колючкин, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одиноков, Н.В. Пирютин, В.Е. Талалаев, И.К. Цыганов, О.И. Воскресенская, Н.В. Москвичёв* 110

1.6 Микро-дисплеи для цифровой голографии. *И.Н. Компанец, А.Л. Андреев* 114

Секция №2
Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики

2.1 Голограммный комбинер проекционного дисплея: моделирование и расчет. *Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов* 125

2.2 Изменение свойств голографических дифракционных решеток на бихромированном желатине после воздействия коротковолнового УФ излучения. *Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, И.А. Маурер* 131

2.3 Фазовая демодуляция световых полей в лазерной интерферометрии, основанной на динамических голограммах диффузионного типа в фоточувствительных кристаллах. *С.М. Шандаров, Н.И. Буримов, С.С. Шмаков, А.О. Злобин, В.И. Быков, В.В. Шепелевич, А.В. Макаревич, К. Щербин* 140

2.4 Голографические сенсоры и возможности их применения. *А.В. Крайский, В.А. Постников, Т.В. Миронова, Т.Т. Султанов, А.А. Крайский, М.А. Шевченко* . 148

2.5 Волноводные и ПВО голограммы в осветительных и дисплейных системах. *А.Н. Путилин* 153

2.6 Энергетически эффективные формирователи амплитудно-фазового распределения лазерных пучков для голографии и интерферометрии. *О.В. Польщикова, А.Ф. Смык, А.В. Шурыгин* 156

Секция №3
Объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии

3.1 Сравнение характеристик гибридных фотополимерных материалов «Гибример-Татс» и «ORMOCOMP», предназначенных для прямой лазерной записи. *Н.Г. Миронников, В.П. Корольков, Д.И. Деревянко, В.В. Шекловников, А.Г. Полещук* 161

3.2 Особенности воздействия излучения на образцы полимерного материала «Диффен». *О.В. Андреева, Б.Г. Манухин, Д.А. Мосейко, Н.В. Андреева* 166

3.3 Интерференционные явления в метализированном анодированном алюминии и варианты их применения. *В.В. Шелковников, Г.А. Любас, С.В. Коротаев* 172

3.4 Введение в иконику изобразительных голограмм. Воспроизведение цвета. *А.И. Шварцвальд* 176

3.5 Исследование глубины пространства, воспроизводимого автостереоскопической многоракурсной системой. *Ю.Н. Овечкис, А.И. Винокур* 180

Секция №4
Голограммные и дифракционные оптические элементы: методы компьютерного синтеза, метаматериалы, плазмонные структуры и технологии изготовления

4.1 Контроль характеристик дифракционных оптических элементов в процессе изготовления. *А.С. Конченко, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, В.Н. Хомутов, В.В. Черкашин* 187

4.2 Дифракционные оптические элементы с двойной функциональностью в изображающих гиперспектрометрах. *В.А. Бланк, Р.В. Скиданов* 191

4.3 Разработка оптической схемы измерительного стенда для контроля лучевой стойкости дифракционных решёток. *К.С. Коренной, Э.Р. Муслимов* 194

4.4 Делительная машина маятникового типа применительно к решению проблемы изготовления нарезных дифракционных решеток на неплоских подложках. *А.В. Лукин, А.Н. Мельников* 198

4.5 Экспериментальное исследование объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток для астрономического спектрографа умеренного разрешения. *А.А. Белокопытов, Ф.А. Саттаров, Н.М. Шигапова, Э.Р. Муслимов, И.И. Ахметшина* 200

Секция №5
Голографическая интерферометрия, голографическая память, оптико-голографическая обработка информации

5.1 Анализ выявления коррелированных фрагментов в серии изображений наложенными голограммами. *А.В. Павлов* 207

5.2 Интерферометр Саундерса с плоским эталоном для измерения диаметра кремниевого шара. *Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин, В.Л. Минаев* 211

5.3 Двусторонний интерферометр для контроля концевых мер длины с голографическим оптическим элементом. *В.В. Орлов* 215

5.4 Распознавание изображений, подвергнутых искажениям геометрии, с помощью составных голографических фильтров для оптико-электронных корреляторов. *П.А. Иванов* 218

5.5 Голографическое исследование пароплазменного облака, формирующегося при лазерно-плазменной обработке образца, находящегося в жидкости. *С.В. Васильев, А.Ю. Иванов, А.В. Копыцкий* 222

Стендовые доклады

Секция №1
Технологии в области защитных голограмм

C1.1 Оптический поляризационный прозрачный защитный элемент на основе пигментов с высоким показателем преломления. *А.И. Горчарук, П.В. Моисеенко, Л.В. Танин, А.Г. Бобореко* 229

C1.2 Получение новых защитных элементов и визуальных эффектов в многоцветных отражательных защитных голограмм. *Д.С. Лушников, В.В. Маркин, А.Ю. Жердев, С.Б. Одиноков, А.В. Смирнов, Б.В. Акимов* 235

C1.3 Формирование и свойства объемных и гибридных объемно-поверхностных периодических структур и элементов на их основе. *Н.Д. Ворзобова, В.О. Веселов* .. 238

C1.4 Получение тонкопленочных картинных анизотропных элементов на рельефно-структурированных поверхностях. *В.М. Козенков, Б.Р. Шаталов* 241

C1.5 Коноскопическая голография в «белом» свете на фотоанизотропных средах. *В.М. Козенков, А.А. Спахов* 247

C1.6 Композиции УФ-отверждения для голографии. *А.В. Жданова, О.Э. Бабкин, В.Н. Михайлов* 249

C1.7 Получение защитных голограмм с визуализацией звукового поля. *М.С. Ковалев, К.Г. Красин, С.Б. Одиноков, Н.Г. Сцепуро* 251

Секция №2
Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики

C2.1 Исследование пространственно-энергетических характеристик фокальных областей бифокальных дифракционно-рефракционных хрусталиков глаза. *Г.А. Ленкова* 255

C2.2 Определение характеристик капли методами цифровой голографии. *А.С. Ольшуков, В.В. Демин* 259

C2.3 Использование алгоритма адаптивной оптимизации для получения заданных амплитудно-фазовых характеристик волнового фронта. *Т.А. Вовк, Н.В. Петров* 260

C2.4 Управление мощностью и модуляция лазерного излучения с применением уголкового отражателя с дифракционным элементом. *В.А. Комоцкий, В.И. Корольков, Ю.М. Соколов, Н.В. Суетин* 264

C2.5 Применение дифракционных оптических элементов для измерения сферической аберрации. *С.С. Копёнкин, Ю.П. Бородин, Д.С. Копёнкин, В.В. Дружин* 269

C2.6 Когерентные осветительные системы для голографических дисплеев. *С.С. Копенкин, Ю.П. Бородин, А.Н. Путилин, А.В. Морозов, С.Е. Дубынин* 272

C2.7 Ахроматизация волноводных и ПВО голограмм. *А.Н. Путилин, А.В. Морозов, С.Е. Дубынин* 277

C2.8 Подавление спекл-шума с помощью электрооптической ячейки с негеликоидальным сегнетоэлектрическим ЖК. *А.Л. Андреев, Т.Б. Андреева, И.Н. Компанец, Н.В. Заляпин* 280

C2.9 Методы синтеза фазовых дифракционных оптических элементов алгоритмом «пинг-понг». *М.Н. Кулаков, П.А. Черёмхин* 286

C2.10 Комбинированные дифракционные оптические элементы для оптических устройств отображения информации и систем дополненной реальности. *Я.А. Град, С.Б. Одиноков, А.Б. Соломашенко* 290

С2.11 Модель дифракции излучения на дифракционной решётке в произвольной системе координат для анализа погрешностей расположения элементов оптических систем. *А.Ю. Жердев, С.Б. Одиноков, Д.С. Лушников, В.Е. Талалаев, М.В. Шишова* 293

Секция №3
Объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии

С3.1 Юрий Исаевич Островский — основоположник советской школы голографической интерферометрии. К 90-летию со дня рождения. *Г.В. Островская, И.В. Семенова, О.В. Андреева* 299

С3.2 О популяризации голографии в молодёжной среде. Презентация книги А.А. Акилова и М.К. Шевцова «Голография для любознательных». *А.А. Акилов, М.К. Шевцов* 303

С3.3 Влияние коронного разряда на запись голографических дифракционных решёток в структуре $Cu-As_2Se_3$. *А.М. Настас, М.С. Иову, А.М. Присакар* 308

С3.4 Методы и аппаратура с большими полями визуализации на основе использования осевых синтезированных голограмм для оснащения газодинамических и баллистических установок и комплексов (Памяти А.Ф. Белозёрова и Л.Т. Мустафиной). *А.В. Лукин* 314

Секция №4
Голограммные и дифракционные оптические элементы: методы компьютерного синтеза, метаматериалы, плазмонные структуры и технологии изготовления

С4.1 Оптимизация технологического процесса производства дифракционных решеток-поляризаторов инфракрасного излучения. *П.Ю. Демеев* 321

С4.2 Модернизация программного обеспечения расчета дифракционной структуры синтезированных голограммных оптических элементов. *Ю.И. Апрелев*..... 324

С4.3 Изготовление голограммной дифракционной решетки для рамановского спектрометра с кодирующей апертурой. *А.А. Белокопытов, Ф.А. Саттаров, Н.М. Шигапова, Э.Р. Муслимов, И.И. Ахметшина* 327

С4.4 Использование голограммных оптических элементов с коррекцией аберраций в системах дополненной реальности. *И.А. Гуськов, Э.Р. Муслимов, И.И. Ахметшина* 331

С4.5 Получение комбинированных голограммных и дифракционных оптических элементов методом плазмохимического травления. *Г.Р. Сагателян, С.Б. Одиноков, А.С. Кузнецов, М.С. Ковалев, В.В. Попов* 335

С4.6 Исследование спектрально-угловых характеристик комбинированных ГОЭ-ДОЭ с плазмонными дифракционными решетками и силовыми дифракционными элементами. *А.Ю. Жердев, С.Б. Одиноков, Г.Р. Сагателян, М.В. Шишова, Л.А. Найден* 339

С4.7 Голограммная дифракционная решетка с коррекцией комы в широком спектральном диапазоне. *Р.Р. Ахметгалеева, Н.К. Павлычева* 342

С4.8 Интерферометры Физо на основе компьютерно-синтезированных голограмм. *А.Г. Полещук, Р.К. Насыров* 347

С.4.9 Дифракционно-зеркальный высокоапертурный микрообъектив для фокусировки лазерного излучения в устройствах записи. *А.Г. Полещук, А.Г. Седухин* 351

С4.10 Вращение микромеханических элементов в оптимизированных световых пучках на основе суперпозиций оптических вихрей. *С.В. Ганчевская, Р.В. Скиданов* 355

C4.11 Использование магнитоплазмонных структур в устройствах считывания магнитной информации с документов. *А.С. Кузнецов, Л.А. Найден, А.Ю. Жердев* 359

Секция №5
Голографическая интерферометрия, голографическая память, оптико-голографическая обработка информации

C5.1 Система спекл-оптического контроля состояния силовых элементов конструкций машиностроения. *А.Н. Малов, П.В. Павлов, А.В. Неупокоева* 365

C5.2 Интерференционный микроскоп Линника с супергладким опорным зеркалом. *В.Л. Минаев, Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин* 374

C5.3 Оптимизация лазерно-компьютерной системы для получения спекл-интерферограмм форм колебаний цилиндрических оболочек. *В.И. Шанин*..... 378

C5.4 Формирование, анализ и классификация гиперспектральных изображений. *О.И. Потатуркин, С.М. Борзов* 380

C5.5 Разработка компьютерно-синтезированной голограммы для датчика волнового фронта. *М.С. Ковалев, П.И. Малинина, С.Б. Одиноков* 382

C5.6 Программно-аппаратный комплекс датчика формы волнового фронта. *В.Н. Хомутов* 384

C5.7 Спектральные свойства слоистых голографических отражательных структур. *Е.Ф. Пен, П.А. Чубаков*..... 388

C5.8 Оптическое кодирование QR кодов с использованием пространственно-некогерентного освещения. *В.В. Краснов, Р.С. Стариков* 394

C5.9 Применение DMD-модулятора для вывода голографических фильтров в некогерентном корреляторе. *Д.Ю. Молодцов, В.В. Краснов, П.А. Черёмхин, В.Г. Родин* 398

C5.10 Применение двух источников излучения в оптической схеме спекл-интерферометра в задачах экспериментальной доводки деталей турбомашин. *А.И. Жужукин*..... 401

C5.11 Лазерная интроскопия кремниевых пластин. *З.Т. Азаматов, В.И. Редкоречев, К.П. Абдурахманов, И.А. Кулагин, Н.А. Акбарова* 405

C5.12 Идентификация состояния лопатки турбины авиационного двигателя до и после теплового воздействия по голографическим интерферограммам. *А.М. Царева, Д.М. Сафина, А.Р. Юсупова, Р.Х. Макаева* 409

Пленарное заседание

Plenary session

П.1 Достижения в области голографии на территории бывшего Советского Союза

Л.В. Танин, В.А. Танин
ЗАО «Голографическая индустрия», Минск, Беларусь

Представлена история вопроса создания, развития и широкого внедрения самостоятельного направления — **художественной голографии**.

Показано, что для успешного развития художественной голографии требовалось решение четырех основополагающих проблем: разработка теории голографического метода, адаптированного к получению крупноформатных голограмм, создание и промышленное освоение нового класса высокоразрешающих регистрирующих сред для записи интерференционных полей с высокой пространственной частотой, разработка технических средств, аппаратуры для регистрации голограмм и технологий серийного выпуска голограмм в условиях производства.

В 60-ые годы, когда была показана лишь возможность и определилась перспективность использования голографического метода для получения копий произведений искусства и памятников культуры и результаты этих исследований прошли первую апробацию в ряде лабораторий страны встал вопрос о создании, развитии и широком внедрении нового самостоятельного направления — художественной голографии. Для успешного развития художественной голографии требовалось решение четырех основополагающих проблем: разработка теории голографического метода, адаптированного к получению крупноформатных голограмм, создание и промышленное освоение нового класса высокоразрешающих регистрирующих сред для записи интерференционных полей с высокой пространственной частотой, разработка технических средств, аппаратуры для регистрации голограмм и технологий серийного выпуска голограмм в условиях производства.

В результате фундаментальных и прикладных исследований, проведенных в период 1967–1987 гг. достигнут высокий уровень разработок в самых разных областях — фоточувствительных средах, лазерной технике, приборостроении и современных технологиях проведения сложных экспериментов. Именно поэтому советские экспозиции голограмм стали предметом «живого» интереса огромного числа различных специалистов за рубежом, т.к. демонстрируют степень развития Советской науки и техники, в частности художественной голографии, и показывают ее приоритет в мире.

Основы голографического метода были заложены в первых работах академика РАН Ю.Н. Денисюка, где впервые было показано, что запись волнового поля в трехмерной светочувствительной среде пригодна для создания объемных картин, воспроизводящих полную иллюзию действительности изображаемого объекта. Эта возможность была подтверждена экспериментами, выполненными с помощью усовершенствованных липпмановских эмульсий.

Метод записи голограмм во встречных пучках значительно расширил возможности художественной голографии.

Весьма удобным в практическом отношении при демонстрации голографических изображений является возможность восстановления их обычным источником света, например, лампой накаливания. Значительные изменения по сравнению с начальными работами претерпела техника и технология проведения голографического эксперимента. Голографическая установка — это сложный и точный интерферометр, а каждый голографический эксперимент — попытка регистрации структуры волнового поля, описываемой высокими пространственными частотами (период до 0,1 мкм) с помощью

«малочувствительного фотодетектора». Для успешного решения этой задачи были разработаны методы стабилизации голографических установок, разработаны методы контроля ее стабильности, выяснены условия, влияющие на успех голографического эксперимента, изучены свойства когерентного излучения лазеров, повышена чувствительность фоторегистрирующих сред. Это привело к тому, что если в начале работы (1967 год) размер голограммы не превышал нескольких десятков квадратных сантиметров и успех голографического эксперимента был практически предсказуем, то сегодня уверенно регистрируется художественные голограммы размером более 1 м^2 и освоен промышленный выпуск голограмм размером 18×24 и 30×40 см.

Значительно расширились и методы регистрации голограмм — появились методы копирования, использующие голограммы, полученные в двумерных и трехмерных средах, методы выноса изображения в предголограмную область. Методы формирования комбинированных, взаимно дополняющих друг друга, объемных и плоских изображений, было предложено использовать поляризационно-чувствительные среды для записи художественных голограмм, разработаны методы цветной голографии и методы импульсной голографии для регистрации художественных голограмм.

При регистрации трехмерных голограмм на первой стадии работы использовались липпмановские фотоэмульсии, обладающие необходимой для голографии разрешающей способностью, но совершенно не пригодные для промышленного освоения. Голография возродила потребность в высокоразрешающих фотоматериалах и были выполнены большие объемы работ по созданию технологичных методов производства голографических материалов и их сенсибилизации к различным областям спектра, которые привели к созданию принципиально нового класса галогенидосеребряных светочувствительных материалов, обладающих разрешающей способностью 6 000–10 000 л/мм, большой прозрачностью и светочувствительностью в единицы Дж/м^2.

Работы по созданию фотослоев шли двумя независимыми и различными путями, один из которых был выбран Н.И. Кирилловым, другой И.Р. Протас. В результате были созданы промышленные материалы ЛОИ-2, которые начал выпускать МЗТФ в 1974 году, и ПЭ-2, выпускаемые ПО «Славич» (г. Переславль) с 1978 года.

Изобразительные способности голографии позволили использовать ее для демонстрации уникальных музейных объектов. Необычность голографического изображения, глубокая иллюзия присутствия наблюдаемого объекта приводят к тому, что на голографических экспозициях не возникает вопроса о том, что представлено — копия уникального изделия или его некое изображение. Наблюдатель видит объект, оглядывает его со всех сторон, наблюдает игру света и тени, может заставить смещаться тени от объекта при изменении положения источника света и т.п. — все это приводит к тому, что голографическая копия уникального объекта воспринимается как сам объект. Столь сильный эффект был достигнут благодаря использованию всех потенциальных возможностей голографии, которые раскрываются при детальных исследованиях ее различных методов.

При записи голограммы, в принципе, может быть использован любой источник когерентного излучения. В реальных условиях при записи голограмм освещение объекта и опорная (референтная) волна создаются одним и тем же лазером, т.к. только в этом случае образуется стоячая картина черно-белых полос при взаимодействии светового поля, отраженного объектом, и светового поля опорной волны. Если же взять обычный белый свет, который, как известно, состоит из смешения очень многих цветов, то каждый цвет создавал бы свою интерференционную картину. Перенакладываясь, эти картины стирали бы друг друга, что привело бы к исчезновению результирующей интерференционной картины.

Метод голографии был фактически мало кому известен до 1963 г., когда с появлением первых лазеров удалось получить первые лазерные голограммы естественных объектов.

В принципе существует много всевозможных методов записи голограммы, но все отличия между ними сводятся, в основном, к различному взаимному расположению источника опорной волны, фотопластинки и объекта во время записи. Это приводит к тому, что в эмульсионном слое образуются интерференционные картины из черно-белых полос различной сложности и конфигурации, и при восстановлении изображения голограммой требования, предъявляемые к восстанавливающему источнику света, могут быть различными. Так при восстановлении изображения с голограмм, записанных и по схеме Д. Габора и по схеме, предложенной Э. Лейтом и Ю. Упатниексом (так называемая двумерная схема записи), необходим так же, как и при записи, когерентный источник излучения — лазер. В схеме, предложенной Ю.Н. Денисюком, записываемая в эмульсионном слое интерференционная картина при регистрации голограммы, имеет очень сложную пространственно-объемную структуру. (Этот способ получил название — голография с записью в трехмерной среде). Благодаря этому, на стадии восстановления она менее «придирчива» к качеству света, и воспроизведение изображения объекта с такой голограммы не обязательно осуществлять специальным источником света — лазером, как при ее записи. Можно использовать обычный источник белого света — солнце, лампу и пр. Голограмма сама выберет из излучения белого источника и отразит в световое поле объекта только ту часть спектра, которая участвовала при ее записи, т.е. кроме всего прочего, трехмерная голограмма воспроизводит также и цвет.

Следует также вспомнить, что коллективом авторов Государственного оптического института им. С.И. Вавилова, Институтов физики АН БССР и АН УССР, Института кибернетики АН ГрССР, Научного совета по выставкам работ АН СССР, Министерства электронной промышленности СССР, Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР, Министерства химической промышленности СССР, Министерств культуры СССР и УССР, Белорусского оптико-механического объединения в соответствии с Координационным планом Академии наук СССР (подпрограмма 1.5.2.1.) и планами отраслевых министерств и ведомств в период с 1967 по 1987 годы выполнена работа «Разработка технических средств и методов получения крупноформатных художественных голограмм с целью пропаганды достижений советской науки и техники и широкого показа голографических копий произведений искусства и памятников культуры» и представлена на соискание премии Совета Министров СССР 1998 года. В коллектив авторов данной работы вошли: Денисюк Ю.Н., Мирошников М.М., Ермолаев М.М., Протас Р.Р., Усанов Ю.Е., Смаев В.П., Загорская З.А., Брыскин В.З., Бурский В.А., Видмант Ф.В., Калинин А.Н., Кириллов Н.И., Масленкова Н.Г., Климзо Э.Ф., Шевцов В.И., Шварцвальд А.И., Рубанов А.С., Танин Л.В., Какичашвили Ш.Д., Явтушенко И.Г., Марков В.Б., Соболев Г.А., Ванин В.А.

Выполненный в рамках данной работы комплекс фундаментальных научных исследований, проектно-конструкторских и технологических разработок направлен на развитие методов голографии и, в частности, художественной крупноформатной голографии, являющейся новой формой международного культурного обмена, способствующей пропаганде достижений советской науки и техники и показу голографических копий произведений искусства и памятников культуры СССР.

Однако, отсутствие в мировой практике специально разработанной технологии записи художественных голограмм и регистрирующих материалов для них сдерживало широкое применение отражательных голограмм для указанных целей. Художественная голография требует высокого уровня развития различных, связанных с ней научных направлений и промышленных технологий, поэтому ее достижения отражают научно-технический потенциал страны, представляющей голографические экспозиции.

Представленный коллектив авторов выполнил большую работу по созданию и разработке методов и средств художественной голографии с целью широкой пропаганды достижений отечественной науки за рубежом и в различных регионах нашей страны, результатом чего явилось формирование нового направления в музейной и выставочной работе.

Предложенные принципы синтеза голографических светочувствительных сред позволили создать новый класс прозрачных фотоматериалов с большой разрешающей способностью, необходимой для получения высококачественных художественных голограмм с максимальным эффектом реальности демонстрируемого с их помощью объекта.

Были разработаны оригинальные методы синтеза особомелкозернистых галогенсеребрянных эмульсий со средним диаметром непроявленных микрокристаллов галогенида серебра порядка 0,005—0,03 мкм, а также условия оптимальной спектральной сенсибилизации последних к лазерному излучению. Эти разработки были доведены до промышленного внедрения и выпуска голографических фотоматериалов ЛОИ-2 (1974) и ПЭ-2 (1978 г.), которые до сих пор не имеют равных аналогов за рубежом.

Авторами данной работы были созданы оригинальные методы химико-фотографической обработки голографических материалов, обеспечивающие высокое качество восстановленных изображений, что совместно с разработанными фотоматериалами сделало голографические экспозиции предметом огромного интереса не только для специалистов, но и для широких кругов общественности.

Наряду с решением химико-фотографических проблем были предложены оригинальные принципы регистрации голограмм с выносом изображения в предэкранное пространство, методы получения и формирования комбинированных, взаимно дополняющих друг друга, объемных и плоских изображений, методы записи круговых голограмм на фотопленке, способы получения оптических «слепков», основанные на использовании голографических свойств псевдоскопического изображения, новые применения поляризационно чувствительных сред. Совокупность этих разработок позволила организовать промышленный выпуск художественных голограмм, используемых в качестве учебных пособий, товаров народного потребления, являющихся предметом экспорта, а также осуществить мелкосерийный выпуск голограмм уникальных памятников истории и культуры для комплектования голографических выставок, проводимых в СССР и за рубежом.

Зарубежные выставки достижений СССР в области голографии организовывались Научным советом по выставкам работ АН СССР и академией наук союзных республик, Комиссиями СССР и УССР по делам ЮНЕСКО, министерствами культуры СССР и УССР, Госпланом БССР и ГКНТ Грузинской ССР, а также использовались отдельные экспозиции голограмм на международных выставках и ярмарках, с участием Торгово-промышленной палаты СССР и Всесоюзного объединения «Международная книга». Проведение этих выставок явилось новой нетрадиционной формой пропаганды достижений советской науки и техники и служило широкому показу уникальных памятников истории и культуры нашей страны. Было проведено около 40 зарубежных выставок, которые посетило в общей сложности свыше 5,0 млн. человек.

Одновременно с проведением зарубежных выставок аналогичная работа проводилась в СССР. Голографические выставки организовывались академиями наук СССР, УССР и БССР совместно с министерствами культуры СССР и УССР, Выставкой достижений народного хозяйства СССР, Выставкой передового опыта народного хозяйства УССР и БССР, Государственным оптическим институтом им. С.И. Вавилова, Домом оптики ГОИ им. С.И. Вавилова, НПО «Платан».

В Минске с 13 февраля по 17 марта 1978 г. в выставочном зале Президиума АН БССР, а затем на ВДНХ БССР проходила первая в СССР выставка художественных голограмм

«Голография-78», организованная Институтом физики АН БССР, Государственным оптическим институтом им. С.И. Вавилова, Всесоюзным научно-исследовательским кинофотоинститутом (г. Москва), КБ киноаппаратуры (г. Москва), Ленинградским институтом ядерной физики им. Константинова АН СССР, Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе АН СССР, Институтом физики АН БССР, Институтом физики УССР, Институтом кибернетики ГрССР, МИРЭА, НПО «Платан», ПО «Славич», Госниихимфотопроектом и Научным советом АН СССР.

Следует особо отметить, что успешное развитие работ в области художественной голографии в СССР и их применение для популяризации памятников истории и культуры явилось объектом пристального внимания международных и общественных организаций. Учитывая актуальность и направленность этих работ, их широкое развитие в СССР ЮНЕСКО включила их в Программу своей деятельности (Крупная программа XI раздел 22С/5 пункт 11 116).

Основные результаты работы — разработаны технические средства и методы регистрации художественных голограмм и с их помощью созданы голографические экспозиции, которые проводились более 50 раз в СССР, 40 раз за границей и общее число посетителей составило по Советскому Союзу — 13 млн. человек, за границей более 5,0 млн. человек.

Сегодня хочется отдать дань глубокого уважения и благодарности прежде всего отечественным профессионалам высокого уровня и долга, замечательным людям, которые преданно до фанатизма относились и относятся к исследованию, покорению и вхождению в нашу повседневную жизнь этого уникального явления, названного голографией: Ю.Н. Денисюку, Ю.И. Островскому, Г.В. Островской, С.Б. Гуревичу, Г.В. Скроцкому, Л.М. Сороко, И.Р. Протас, Н.И. Кириллову, Н.Г. Власову, И.Н. Компанцу, Л.Д. Бахраху, Ш.Д. Какичашвили, А.П. Капице, А.С. Рубанову, М.С. Соскину, В.Г. Сидоровичу, И.С. Клименко, Б.Г. Турухано, Н. Турухано, К.К. Шварцу, О.А. Озолсу, М.М. Бутусову, М.П. Петрову, О.Б. Серову, И.П. Налимову, В.Г. Комару, Ю.Н. Овечкису, В.А. Сойферу, В.М. Гинзбург, Г.Г. Левину, Г.Н. Вишнякову, Ю.И. Филенко, Е.Н. Лехциеру, А.Н. Метелкину, Н.Л. Казанскому, А.Г. Полещуку, Г.И. Грейсуху, Г.Б. Семенову, К.С. Мустафину, А.В. Лукину, Е.И. Штыркову, Г.А. Соболеву, С.Б. Шевченко, В.А. Ванину, А.И. Шварцвальду, В.Б. Маркову, С.Г. Одулову, В.Б. Тараненко, И.Г. Явтушенко, А.Н. Тимошенко, А.В. Крейтеру, Н.Г. Орловой, Л.В. Некрасовой, Ю.Е. Усанову, З.А. Загорской, В.Б. Константинову, Г.А. Гаврилову, Г.В. Дрейден, Е.Н. Шедовой Н.М. Ганжерли, Е. Бруи, В.И. Суханову, Д.И. Стаселько, Е.В. Ивакину, А.Д. Гальперну, М.К. Шевцову, О.В. Андреевой, В.П. Смаеву, М.М. Ермолаеву, В.З. Брыскину, Н.Л. Кособоковой, С.Б. Одинокову, А.И. Чепурному, В.А. Барачевскому, Р.Р. Герке, Е.Н. Богачевской, Л.А. Бондареву, А.Ф. Смыку, С.П. Воробьеву, С. Захаравасу, Ю.А. Сазонову, А.В. Гончарскому, А.Н. Малову, И.П. Петровичу, А.М. Лазаруку, Б.Н. Тюшкевичу, Н.М. Спорнику, В.А. Бурскому, С.Н. Гинаку, С.А. Рыжечкину, П.В. Моисеенко, В.В. Маникало, Е.А. Мельниковой, А.Л. Толстику, В.В. Шепелевичу и многим другим, с кем предоставила мне жизнь возможность общаться, трудиться, учиться, набираться опыта.

У голографии большое будущее, мы все лишь только прикоснулись к ней.

Уверен, что молодое поколение голографистов, которым мы передаем сегодня все свои знания и опыт, будут открывать новые страницы в истории голографии, которую ждет еще не один виток.

Advance in holography field in the territory of the former Soviet Union

L.V. Tanin, V.A. Tanin
CJSC "Holography industry", Minsk, Belarus

The background information of the creation, development and wide implementation of a new independent field — **art holography** — is represented. It is shown, that for the successful development of art holography the solutions of four fundamental problems such as the theoretical development of holographic method adapted to receiving large-sized holograms, creation and industrialization of a new class of high-resolution recording medium for interference fields recording with high spatial frequency, the development of technical facilities, equipment for recording holograms and production word order of holograms.

In the 60s, when only the possibility of using holographic method for obtaining copies of art works and cultural monuments was shown and prospects were determined, a question about the creation, development and broad implementation of a new independent field — art holography was raised after the first results of approbation in a number of laboratories throughout the country. Four fundamental problem solutions such as the development of the theory of holographic method adapted to receive large format holograms, creation and industrial development of a new class of high-resolution hologram medium for interference fields recording with high spatial frequency, the development of technical tools, equipment for recording holograms and serial production of hologram technologies in a productive process were required for the successful development of art holography.

High level of development was achieved as a result of fundamental and applied researches carried out in the period of 1967–1987 in various fields such as photosensitive media, laser technology, instrumentation and modern technologies for complex experiments. That is why the Soviet holograms expositions were the subject of intense interest of a huge number of different specialists abroad. It demonstrates the degree of development of Soviet science and technology — the holography art, in particular, and shows its priority in the world.

The basis of holographic methods was laid in the first works of the corresponding member of the USSR Academy Y.N. Denisyuk, who was the first to show that the record of the wave field in a three-dimensional light-sensitive medium is suitable for creating three-dimensional picture to reproduce the illusion of reality of the objects. This possibility was confirmed by experiments performed with the help of advanced Lippmann emulsions.

The method of holograms recording in colliding beams significantly expanded abilities of display holography.

The ability to restore conventional light sources such as incandescent lamps is extremely convenient in practical terms in case of holographic images demonstration. The significant changes in technique and technology of holographic experiment were made in comparison with the initial work.

The holographic system is a complex and accurate interferometer. Each holographic experiment is an attempt to register the structure of the wave field, described by a high spatial frequency (period to 0.1 μm) using the "insensitive photodetector".

To solve this problem the methods of holographic systems stabilization, and the methods of stability control were developed, the conditions affecting the success of the holographic experiment and the properties of coherent laser radiation were studied, the sensitivity photo recording environments were increased.

This led to the fact that if the size of the hologram at the beginning of the work (1967) did not exceed a few dozens of square centimeters, and the success of the holographic experiment was

almost predictable. Now display holograms larger than 1m^2 are recorded and the industrial production of holograms size 18×24 and 30×40 cm are reliably mastered.

Different methods of recording holograms expanded considerably, there were methods of holograms copying using holograms in two-dimensional and three-dimensional media, techniques of removing an image in the area before creating a hologram. Methods of forming a combined, complementary to each other, volume and flat images, it was suggested that the polarization-sensitive recording medium must be used for art holograms. The methods and techniques of color holography and pulse holography were developed for recording art holograms.

On the first stage of work upon the registration of three-dimensional holograms Lippmann emulsion with suitable resolution for holography was used, but it was not suitable for industrial development.

Holography has revived the need for high-resolution photographic material and there are many works on the creation of technological methods of production of holographic materials and their sensitization to different regions of the spectrum, which led to the creation of a fundamentally new class of light-sensitive silver halide materials with resolution 6 000–10 000 l/mm, high transparency and sensitivity in unit J/m^2.

There were two independent and different ways in the work on the creation of photographic layer, the one was selected by N.I. Kirillov, the other was selected by I.R. Protas. As a result the industrial material LOI-2 was produced by MZTF in 1974 and PE-2 was produced by "Slavich" in Pereslavl in 1978.

Visual abilities of holography were used to demonstrate unique museum objects.

The singularity of a holographic image, a deep illusion of presence of the observed object help to answer the question what is presented, a copy of a unique product or a certain image. An observer sees an object, studies it, watches the play of light and shadow, can cause shifting shadows of the object by changing the position of the light source, etc. All this leads to the fact that a holographic copy of a unique object is perceived as the object itself. Such a strong effect was achieved through the use of the full potential of holography, which is disclosed in detailed studies of different methods.

Theoretically, when recording a hologram any coherent light source may be used. In real conditions when recording holograms illumination of the object and the reference wave are created by the same laser because only in this case a standing pattern of black and white stripes is in the interaction of the light field, reflected by the object, and the light field of the reference wave. If we take an ordinary white light, which is consisted of a mix of many colors, each color would create its interference pattern. Overlapping one another these pictures will wash one another, which will lead to the disappearance of the resulting interference pattern.

Actually holographic method was little-known until 1963, when with the invention of the first lasers the first laser holograms of natural objects were created.

Theoretically there are many possible methods to record a hologram, but the differences between them are reduced mainly to a different relative position of the source of the reference wave, the object and the photographic plate during recording. This leads to the fact that in the emulsion layer the interference patterns are formed of black and white stripes of varying complexity and configuration, and in the process of the hologram reconstruction of the image the requirements to restore the light sources may be different. Thus the image reconstruction from holograms recorded on the basis of D. Gabor scheme and the scheme of E. Leith and J. Upatnieks (so-called two-dimensional configuration recording) a coherent light source, the laser, is required as in the recording. In the scheme proposed by Y.N. Denisyuk the interference pattern is recorded in the emulsion layer in the process of hologram registration, and it has a very complex spatial and three-dimensional structure. (This method is called the holography recording in three-dimensional

environment). Because of this, at the stage of recovery, it is less "picky" to the quality of light, and the playback of the object image from such hologram does not need a special light source — laser, as in the process of recording. You can use an ordinary white light source — the sun, a lamp and so on. The hologram will choose from a white light source and will reflect in the light field of an object only that part of the spectrum, which has participated in its recording, and above all a three-dimensional hologram also reproduces color.

It should be mentioned that the group of authors of the State Optical Institute in the name of S.I.Vavilov, the Institute of Physics of the Ukrainian Academy of Sciences, the Institute of Physics of the Belarusian Academy of Sciences, the Institute of Cybernetics of the Academy of Sciences of GrSSR, the Scientific Council on the exhibition of works by the USSR Academy of Sciences, the USSR Ministry of Electronic Industry, RSFSR Ministry of Higher and Secondary Special Education, the USSR Ministry of Chemical Industry, the Ministry of Culture of the USSR and the Ukrainian SSR, Belarusian Optical & Mechanical association in accordance with the Coordination Plan of the USSR Academy of Sciences (sub-1.5.2.1.) and the plans of ministries and departments in the period from 1967 to1987 the work "The Development of technical means and methods of producing large-format art holograms to promote the achievements of Soviet science and technology and public display of holographic copies of works of art and cultural monuments" was done and presented the Council of Ministers of the USSR award in 1998. The team of authors of this work were: Y.N. Denisyuk, M.M. Miroshnikov, M.M. Ermolaev, R.R. Protas, Y.E. Usanov, V.P. Smaev, Z.A. Zagorskaya, V.Z. Bryskin, V.A. Burskii, F.V. Vidmante, A.N. Kalinin, N.I. Kirillov, N.G. Maslenkova, E.F. Klimzo, V.I. Shevtsov, A.I. Schwarzvald, A.S. Rubanov, L.V. Tanin, Sh.D. Kakichashvili, I.G. Yavtushenko, V.B. Markov, G.A. Sobolev, V.A. Vanin.

A set of fundamental scientific research, design and technological development aims to develop methods of holography and, in particular, large-format art holography, which is a new form of international cultural exchange, that will promote the achievements of Soviet science and technology and show holographic copies of works of art and cultural monuments of the USSR.

However, the absence of a specially designed recording technology of art holograms and the lack of recording materials for them restrained a wide usage for these purposes. Art holography requires a high level of development of different related scientific fields and industrial technologies, that's why the achievements reflect scientific and technical potential of the country presenting the holographic expositions.

The group of authors did a lot of work on the creation and development of methods and means of art holography in order to make a wide promotion of the achievements of Soviet science abroad and in different regions of the country, which resulted in the formation of a new direction in the museum and exhibition work.

The proposed principles of synthesis of photosensitive holographic media helped to create a new class of transparent photographic materials with high resolving power that was required to produce high-quality art holograms with maximum effect of reality of a demonstrated object.

The original methods of the synthesis of fine silver halide emulsions especially with an average diameter of undeveloped silver halide microcrystals of 0.005—0.03 μm were developed, as well as the conditions for optimal spectral sensibilization of them to the laser. These developments were brought to the commercial introduction and release of holographic photographic materials LOI-2 (1974) and PE-2 (1978), which still do not have equal prototypes abroad.

The authors of this work have created original methods of chemical-photographic processing of holographic materials, providing high quality of reconstructed images, which together with the developed photographic materials made holographic expositions a subject of great interest to specialists and the general public.

In addition to solving chemical-photographic problems the original principles of hologram recording with the removal of the image, the methods of obtaining and forming of combined, complementing each other, volume and flat images, recording techniques of circular holograms on the film, the methods of optical model producing based on the use of holographic characteristics of pseudoscopic image, a different way to use of a polarization-sensitive environments were proposed. The combination of these developments allowed to organize industrial production of art holograms, which were used as teaching aids, consumer goods that are exported, as well as to carry out low-volume production of holograms of unique historical and cultural monuments for the acquisition of holographic exhibitions in the USSR and abroad.

Foreign exhibitions of achievements of the USSR in the field of holography organized by the Scientific Council on exhibitions of works of the USSR and the Academy of Sciences and the Academy of the Union republics, the Commission of the USSR and the USSR for UNESCO, Ministry of Culture of the USSR and the Ukrainian SSR, the Byelorussian SSR state plan and SCST Georgian SSR, as well as some expositions of holograms were used on the international exhibitions and fairs, with the participation of the Chamber of Commerce of the USSR and the Union "International Book". Carrying out these exhibitions was a new non-traditional form of promotion of the achievements of Soviet science and technology. These exhibitions served as a wide display of unique monuments of history and culture of our country. There were about 40 international exhibitions, which was attended by 5.0 million people.

In conjunction with the foreign exhibitions similar work was carried out in the USSR. Holographic exhibitions were organized by the USSR Academy of Sciences, Ukrainian SSR and Byelorussian SSR, together with the Ministries of Culture of the USSR and the Ukrainian SSR, the exhibition of achievements of the National Economy of the USSR, the exhibition of the best practices of the National Economy of the Ukrainian SSR and the Byelorussian SSR, State Optical Institute in the name of S.I. Vavilov, the House of Optics of the State Optical Institute in the name of S.I. Vavilov, NPO "Platan".

From 13th of February to 17th of March 1978 in Minsk. the first in the USSR exhibition of art holograms "Holography-78" took place in the exhibition hall of the Presidium of the Academy of Sciences of the BSSR, and then at ENEA BSSR, which was organized by the Institute of hysics of the Academy of Sciences of the BSSR, the State optical Institute in name of S. I. Vavilov, All-Soviet Union scientific research cinema and photo institute (Moscow), KB cinematographic instrumentation (Moscow), Leningrad Institute of nuclear physics in name of Konstantinov of the USSR Academy of Sciences, Physical-technical Institute in name of A. F. Ioffe of the Academy of Sciences of the USSR, Institute of physics of the BSSR Academy of Sciences, Institute of physics of the Ukrainian SSR, Institute of Cybernetics of the Georgian SSR,MIREA, SPA "Platan", PA "Slavich", Gosniihimphotoproect and the Scientific Council of the Academy of Sciences of the USSR.

It should be specially noted that the successful development of works in the field of art holography in the USSR and their use for the promotion of historical and cultural monuments was the object of attention of international and public organizations. Given the urgency and focus of these works, their extensive development in the Soviet Union, UNESCO included them in its program (Major Programme XI section 22C / 5 paragraph 11, 11b).

The development of technical tools and the methods of art holograms registration were the main results of the work. And the use of these achievements helped to set up a holographic expositions that took place more than 50 times in the USSR and 40 times abroad. The total number of visitors in the Soviet Union was 13 000 000. And the total number of visitors abroad was more than 5 000 000.

Today I would like to pay my deep respect primarily to national high-level professionals, wonderful people who are fanatically devoted to research, conquest and entry into our everyday life of this unique phenomenon called holography: Y.N. Denisyuk, Y.I. Ostrovsky, G.V. Ostrovskaya, S.B. Gurevich, G.V. Skrotski, L.M. Soroko, I.R. Protas, N.I. Kirillov, N.G. Vlasov, I.N. Kompanets, L.D. Bakhrakh, Sh.D. Kakichashvili, A.P. Kapitse, A.S. Rubanov, M.S. Soskin, V.G. Sidorovich, I.S. Klimenko, B.G. Turukhano, N. Turukhano, K.K. Schwartz, O.A. Ozols, M.M. Butusov, M.P. Petrov, O.B. Serov, I.P. Nalimov, V.G. Komar, Y.N. Ovechkis, V.A. Soifer, V.M. Ginzburg, G.G. Levin, G.N. Vishnyakov, U.I. Filenko, E.N. Lehtsier, A.N. Metelkin, N.L. Kazanski, A.G. Polishchuk, G.I. Greisukh, G.B. Semenov, K.S. Mustafin, A.V. Lukin, E.I. Shtyrkov, G.A. Sobolev, S.B. Shevchenko, V.A. Vanin, A.I. Schwarzvald, V.B. Markov, S.G. Odulov, V.B. Taranenko, I.G. Yavtushenko, A.N. Tymoshenko, A.V. Krater, N.G. Orlova, L.V. Nekrasova, Y.E. Usanov, Z.A. Zagorskoj, V.B. Konstantinov, G.A. Gavrilov, G.V. Dreiden, E.N. Shedova, N.M. Ganzherli, E. Brui,V.I. Sukhanov, D.I. Staselko, E.V. Ivakin, A.D. Galpern, M.K. Shevtsov, O.V. Andreeva, V.P. Smaev, M.M. Yermolaev, V.Z. Bryskin, N.L. Kosobokova, S.B. Odinokov, A.I. Chepurnoj, V.A. Barachevsky, R.R. Gerke, E.N. Bogachevskaya, L.A. Bondarev, A.F. Smyk, S.P. Vorobiev, S. Zaharavas, Y.A. Sazonov, A.V. Goncharsky, A.N. Malov, I.P. Petrovich, A.M. Lazaruk, B.N. Tushkevich, N.M. Spornik, V.A. Byrski, S.N. Ginak, S.A. Ryzhechkin, P.V. Moiseenko, V.V. Manikalo, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik, V.V. Shepelevich and many others, with whom life has given me the possibility to communicate, work, learn and gain experience.

Holography has a great future, we have only just touched it.

I am sure that the youngest generation of holographers, to whome we pass today all our knowledge and experience, will open a new page in the history of holography, which will make more than one round.

П.2 Голография сейчас — состояние индустрии

М. Сидоров
IHMA, Лондон, Великобритания

Holography now — the state of play

M. Sidorov
IHMA, London, UK

Over the last two decades holography has diversified with holograms now used in security and authentication, in packaging, in optics for vehicles and lighting, in mapping, in promotion and illustration, and in many other manifestations.

Diversity is important across the range of user of holographics, but also within each application, especially security and packaging, which have been the mainstay earner for the industry over the last few decades. The security market for holograms is being challenged — by changing customer requirements, by new systems and products and by misinformation in the market — but the industry is responding with diverse new techniques and products. The parking market for holographics, on the other hand, for over 20 years has been long on promise but short on delivery; that too is changing, as diverse new production methods and fresh design approaches stimulate the market, particularly but not only in China.

This paper will cover the state of holographics today in security and packaging as well as new developments in display holography and origination technologies, interactive real time holograms and the use of holograms in such fields as fashion, vehicle optics and lighting design. And as the industry needs to be aware of developments in competing products, the presentation will include the latest on alternative 3D imaging techniques. A particular attention will also be paid to the latest trends in optically variable device and their exiting as well as potential use in security and authentication for banknotes, travel and identity documents and other security documents.

П.3 Перспективы применения голограммных элементов для юстировки неосевых оптических систем

Б.Н. Сеник[1], Ю.П. Дорошина[1], С.Б. Одиноков[2]
[1] АО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», Красногорск, Россия
[2] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В настоящее время повышеную актуальность в области оптико-электронного приборостроения приобретают неосевые оптические системы. В целом ряде случаев (оптико-электронная аппаратура для дистанционного зондирования Земли, для авиационных средств разведки и т.д.) их использование является единственной возможностью обеспечить в полном объёме выполнение технических заданий на разработку оптико-электронных приборов и комплексов специального назначения.

В качестве примера можно привести разработку оптико-электронного комплекса широкоспектральной аппаратуры среднего разрешения космического базирования. Предельные требования по разрешению, угловым полям, зонам захвата, контрастности, многоспектральности, предельно низкие массо-габаритные параметры противоречивы по своей сути на этапе разработки конструкторской документации. Неосевые оптические системы позволяют по сравнению с классическими обеспечивать увеличение угловых полей, повышать равномерность качества по всему полю изображения и, что самое главное для космической аппаратуры, в значительной степени минимизировать массо-габаритные параметры.

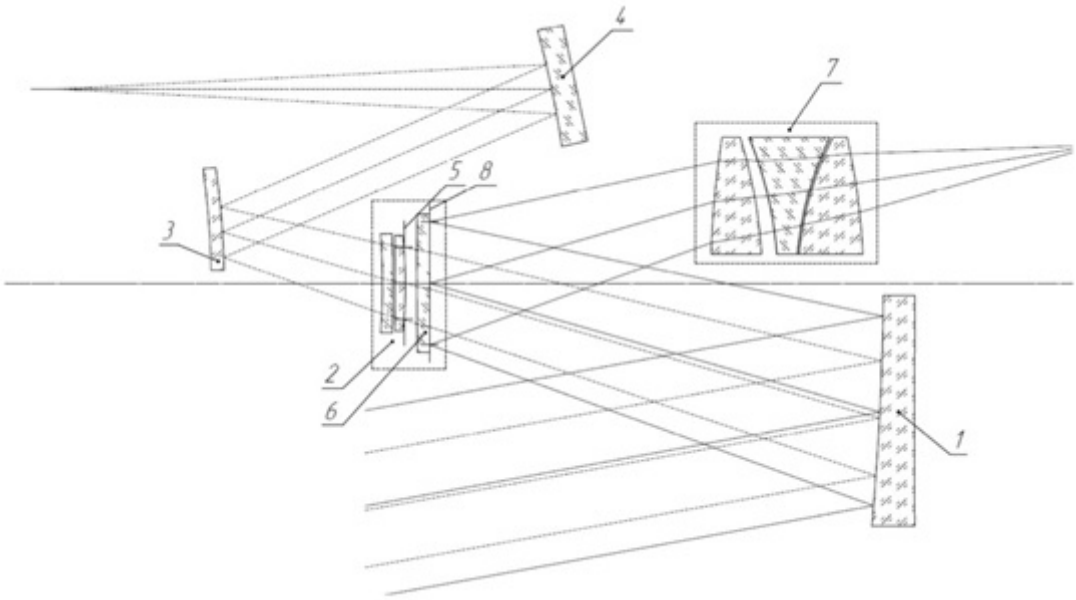
Существует два вида неосевых оптических систем:

- эксцентрические зеркальные системы (триплет Кука), в основе которых неосевые асферические зеркала;
- неосевые рефрактометрические оптические системы, в которых используются сегментированные сферические и асферические элементы.

На сегодняшний день изготовление, контроль неосевых асферических зеркал неразрывно связаны с использованием синтезированных голограммных элементов, которые применяются в схемах контроля качества как самих зеркал, так и в схемах сборки и юстировки эксцентрических зеркальных систем.

На предприятии ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» в рамках выполнения НИОКР по проектированию и изготовлению опытных образцов широкоспектральной аппаратуры среднего разрешения космического базирования (рис. 1), совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана, выполнена работа по разработке технологии сборки, юстировки неосевой рефрактометрической оптической системы, работающей в коротковолновой ИК-области спектра (1,5–1,7 мкм). Вышеуказанная работа является инновационной не только в рамках Российской Федерации. Выполнение вышеуказанной работы потребовало комплексного подхода: создания технологии изготовления крупногабаритных высокоточных сегментированных линз, методики контроля их параметров, а также создания методики и специализированного метрологического стенда для сборки и юстировки трёхкомпонентной неосевой оптической системы. Базовым элементом вышеуказанного стенда является многозональный голограммный компенсатор, изготовленный Институтом автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск.

В докладе подробно излагаются концептуальные вопросы использования голограммных элементов, как основной составляющей технологии сборки и юстировки неосевых крупногабаритных рефрактометрических оптических систем.



7 — коротковолновый ИК-канал
Рис. 1. Оптическая схема двухканального зеркально-линзового объектива широкоспектральной аппаратуры среднего разрешения космического базирования

Источники

[1] Бронштейн Ю.Л. Крупногабаритные зеркальные системы: контроль геометрии, юстировка / М.: ДПК Пресс, 2015. — 600 с.
[2] Заварзин В.И. Методика сборки и юстировки зеркально-линзовых объективов с эксцентрично расположенным полем изображения / В.И. Заварзин, А.В. Ли, С.А. Морозов // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — №7.
[3] URL: http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/822.html

Prospects for potential use of hologram elements in alignment of off-axis optical systems

B.N. Senik, Yu.P. Doroshina, S.B. Odinokov
[1] JSC "Zverev Krasnogorsk factory", Krasnogorsk, Russia
[2] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

At present time off-axis optical systems' significance in electro-optical instrument making industry is constantly rising. In quite a number of cases (electro-optical hardware for remote Earth sensing, for air-borne reconnaissance means and etc.) application of these systems provide the only way allowing full-scale implementation of performance objective for development of special purpose electro-optical devices and complexes.

As an example we can cite development of a space-borne wide-spectrum medium resolution electro-optical complex hardware. Severe requirements for resolution, angular fields, capture zones, contrast range, multispectral parameters being combined with severe requirements for compactness and lightness of the hardware by the very nature contradict each other when these requirements are made at stage of design documentation development. In contrast with traditional ones the off-axis optical systems make it possible to increase angular fields, to improve uniformity

of image quality throughout the whole image field, and, that is crucial for space-born hardware, they allow to reduce hugely weight-and-dimensional parameters.

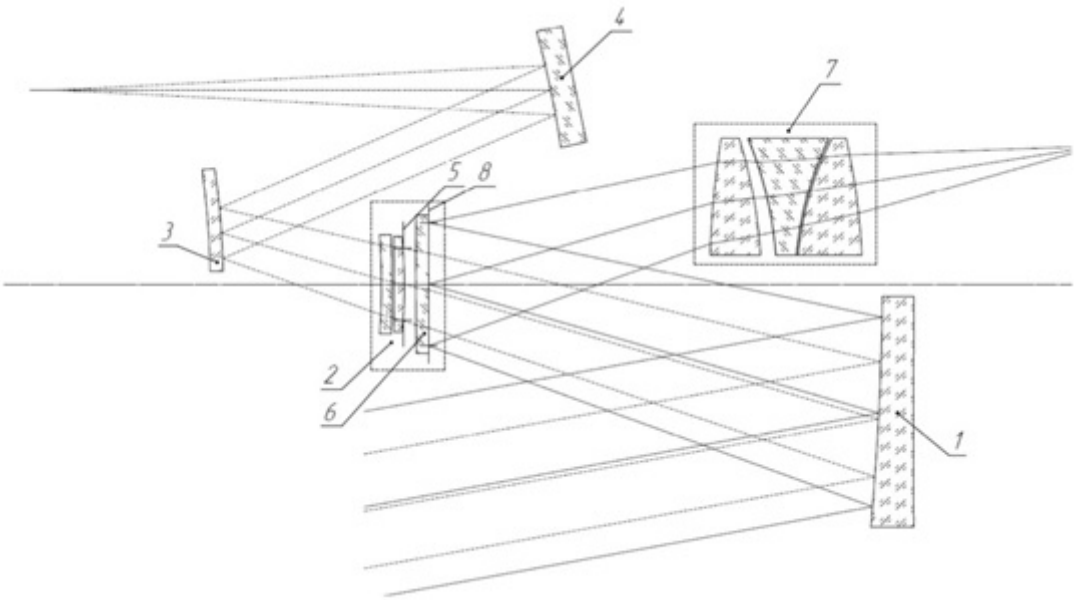
There are two types of off-axis optical systems:

- eccentric mirror systems (Cooke triplet), based on off-axis aspherical mirrors;
- off-axis refractometric optical systems, where segmented spherical and aspherical elements are used.

Currently, off-axis aspherical mirrors manufacturing and quality control procedures are inseparably associated with use of synthesized hologram elements which are applied both in the very mirrors quality controlling schemes and in schemes for assembling and alignment of eccentric mirror systems.

The PJSC "Krasnogorsky Zavod" in cooperation with Bauman MSTU had completed a project within frame of a research, development and engineering activity for development and fabrication of prototypes of space-borne wide-spectrum medium resolution hardware (Fig. 1). To be more specific, there was developed a technology for assembling and alignment of an off-axis refractometric optical system operating in SWIR-portion of spectrum (1.5 to 1.7 μm). The above-mentioned work has innovative character not only for the Russian Federation. Implementation of this work had required to apply a comprehensive approach: to create a technology for fabrication of large-sized high-precision segmented lenses, a technique for monitoring of their parameters. Also there were created a technique and specialized metrological bench for assembling and alignment of three-component off-axis optical system. A multi-zone hologram compensator made by Institute of Automation and Electrometry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk) serves as basic block for said bench.

The report comprises detailed description of conceptual problems related to use of the hologram elements as basic component of the technology for assembling and alignment of large-sized off-axis optical systems.



7 — SWIR-channel

Fig. 1. Optical scheme of double-channel catadioptric lens for space-borne wide-spectrum medium resolution hardware

References

[1] Bronshtein Yu.L. Large-sized mirror systems: geometry control, alignment / Moscow, DPK Press Publishing House, 2015. — 600 p.

[2] Zavarzin V.I. A technique for assembling and alignment of catadioptric lenses with off-centered image field / V.I. Zavarzin, A.V. Lee, S.A. Morozov // Engineering Journal: Science and Innovation. — 2013. — №7.

[3] URL: http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/822.html.

П.4 Последние достижения в области электроннолучевой технологии изготовления оригиналов оптических защитных элементов

А.А. Гончарский, А.В. Гончарский
ООО «Центр Компьютерной Голографии», Москва, Россия

Электроннолучевая технология открывает новые возможности в оптических защитных технологиях. Технология защищена как высокой стоимостью оборудования, так и наукоёмкостью электроннолучевой литографии.

Электроннолучевая технология позволяет изготавливать оптические элементы для формирования как 2D, так и 3D изображений. Актуальной задачей в настоящее время является разработка технологии синтеза оптических защитных элементов, которые невозможно подделать или имитировать с помощью оптической записи оригиналов. Примером такого защитного признака является DeColor effect, основанный на использовании асимметричного микрорельефа. Эффект легко проверяется визуально: при нормальном положении оптического элемента наблюдатель видит одно изображение, а при повороте элемента на 180° — другое изображение на том же месте. Точность изготовления микрорельефа дифракционного оптического элемента составляет порядка 10 нм по высоте. Такие элементы невозможно подделать или имитировать с помощью оптических методов записи оригиналов.

Электроннолучевая технология позволяет изготавливать оптические элементы для формирования 3D изображений. Впервые дифракционные оптические элементы для формирования 3D изображений были использованы в платёжной системе Visa более 20 лет назад. Голубь на пластиковой карте Visa был записан с помощью оптической технологии. Электроннолучевая технология позволяет синтезировать дифракционные оптические элементы, надёжно защищённые от подделки. Примером такого защитного признака является вертикальный switch-effect между двумя 3D изображениями. В нормальном положении оптического элемента наблюдатель видит одно изображение, которое при наклоне оптического элемента вверх-вниз меняется на другое 3D изображение. Защитный признак легко проверяется и надёжно защищён от подделки.

Электроннолучевая технология позволяет изготавливать защитные оптические элементы для инструментального контроля. Существуют портативные приборы для визуализации скрытых CLR (Covert Laser-Readable) изображений на защитных оптических элементах. В этом случае решение о подлинности защитного элемента принимает эксперт.

Электроннолучевая технология позволяет разработать принципиально новые приборы для автоматизированного контроля подлинности документов, банкнот, акцизных марок. Дифракционные элементы для автоматизированного контроля содержат фрагменты изображений, которые визуализируются с помощью лазерного диода. CLR-изображения формируются в фокальной плоскости прибора автоматизированного контроля. Изображение детектируется с помощью оптических детекторов. Решение о подлинности контролируемого защитного элемента принимает микропроцессор. Вес прибора автоматизированного контроля не превышает 100 г. Процедура контроля инвариантна относительно поворота прибора и не требует специальных навыков от эксперта.

Оптические элементы, изготовленные с помощью электроннолучевой технологии, могут тиражироваться стандартным оборудованием для массового изготовления голограмм. Новые оптические защитные признаки для визуального и инструментального контроля надёжно защищены от подделки и могут использоваться для защиты документов, банкнот, акцизных марок и т.д.

Latest development in E-beam optical security technology

A.A. Goncharsky, A.V. Goncharsky
Computer Holography Centre Ltd., Moscow, Russia

Nano-optical elements — a new breakthrough direction in security technology. Electron beam origination technology is used in production of originals of the nano-optical elements. The technology is well protected against counterfeiting or imitation by both the high price of E-beam equipment and complexity of the technology.

E-beam technology offers a wide range of security features for visual control. DeColor effect is an example of such security feature based on asymmetrical micro-relief. The effect is easy for verification: from a normal viewing position an observer sees one image, but after rotation of an element through 180 degrees, an observer sees a different image in the same place.

E-beam technology allows to make not only 2D, but also 3D visual effects. The vertical 3D/3D switch effect is an example of such security feature. The security feature consists in the alternation of two 3D color images when the diffractive element is tilted up/down. The switch effect can be observed under white light.

E-beam technology allows to create CLR (Covert Laser-Readable) images for automatic control. The handheld portable reader for automatic control allows reliable and quick verification of nano-optical elements.

The optical elements created with E-beam technology can be replicated using standard equipment employed for manufacturing security holograms. The new optical security features for visual and instrumental control are safely protected against counterfeit and designed to protect banknotes, documents, ID cards, etc.

П.5 Перспективы получения новых визуальных эффектов в защитных голограммах с помощью наноплазмонных структур и возможность их встраивания в традиционную серийную тонкопленочную технологию

С.Б. Одиноков[1], А.Ю. Жердев[1], Д.С. Лушников[1], М.В. Шишова[1], А.В. Смирнов[2], Б.В. Акимов[2]
[1] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[2] АО «НПО «Криптен», Дубна, Россия

В докладе анализируются варианты расчета и изготовления плазмонных оптических наноструктур в виде одномерных и/или двумерных плазмонных дифракционных решеток (1D-2D ПДР) для их встраивания как оптического защитного элемента в защитные голограммы, изготавливаемые как по стандартной рольной технологии эмбоссирования, так и по технологии плоского УФ-эмбоссирования.

В ходе выполнения работы, которая проводилась по заданию АО «НПО Криптен», г.Дубна, Россия), были получены следующие результаты:

1) разработан метод анализа 1D-2D ПДР на основе метода Фурье-мод решения системы уравнений Максвелла;

2) разработано программное обеспечение (ПО) для анализа спектрально-угловых характеристик 1D-2D ПДР;

3) разработана технология изготовления оптического защитного элемента (ОЗЭ) на основе 1D-2D ПДР.

Целью работы являлось создание визуально наблюдаемого оптического защитного элемента (ОЗЭ), визуально отличающегося от эффектов, воспроизводимых стандартными радужными голограммами, и изготовление экспериментального образца ОЗЭ на основе 1D-2D ПДР в проходящем или отраженном свете.

Недостатками стандартных радужных защитных голограмм при их визуальном наблюдении являются:

1) резкое изменение цветовой гаммы в голографическом изображении при изменении угла наблюдения из-за сильно выраженных дифракционных эффектов;

2) невозможность при наблюдении получения фиксированных или плавно изменяемых цветовых оттенков, что принято как «канон» в защищенной полиграфии.

Для получения фиксированных или плавноизменяемых цветовых оттенков в итоговом голографическом изображении были использованы 1D-2D ПДР со наноструктурой «металл-диэлектрик».

При дизайне защитных оптических плазмонных элементов удобно преобразовать спектрально-угловые диаграммы в формат цветовой шкалы [1–3]. Тогда информация о цвете по принципу аддитивного смешения представляется напрямую, а не зависимостью интенсивности пропускания или отражения в диапазоне длин волн.

Такая конвертация проводится в два этапа по известному алгоритму [5] колориметрических расчетов: вычисление координат цвета в цветовом пространстве XYZ МКО 1931 г. и последующее преобразование в нелинейные координаты цветового пространства sRGB IEC61966–2.1.

Расчет координат цвета XYZ

Перед непосредственным расчетом цветовых координат необходимо установить в каком свете будет проводится эксперимент и последующая эксплуатация защитных элементов с 2D

ПДР. Источник типа D65 является стандартным, принятым международной комиссией по освещенности (МКО), имеет цветовую температуру $T = 6504$ К и максимум спектральной светимости на длине волны примерно 450 нм.

Вычисление координат цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г. проводится по спектральным характеристикам источника освещения в соответствии со следующими выражениями [4].

Алгоритм пересчета XYZ — RGB

Пересчет между цветовыми координатами проводится заключает в себе преобразование из цветового пространства XYZ в линейное пространство R′G′B′ и преобразование из линейного пространства R′G′B′ в нелинейное пространство RGB.

Выбор цветового пространства

Два наиболее часто используемых рабочих пространства в цифровой фотографии — это Adobe RGB (1998) и sRGB IEC61966–2.1. Оба этих пространства представлены для источника D65 и устанавливают набор цветов, доступных для работы при редактировании изображения. Цветовое пространство sRGB приблизительно соответствует гамме большинства распространённых мониторов и, что важно для нашей модели, определено по умолчанию в программе Matlab. Гамма цветности sRGB одна из самых узких среди рабочих протранств и покрывает всего 35% видимых цветов, определённых МКО 1931 г., но тем не менее считается достаточно широкой для большинства цветовых применений. На рис. 1 спектр цветов sRGB очерчен треугольником среди общего спектра доступных человеческому глазу цветов.

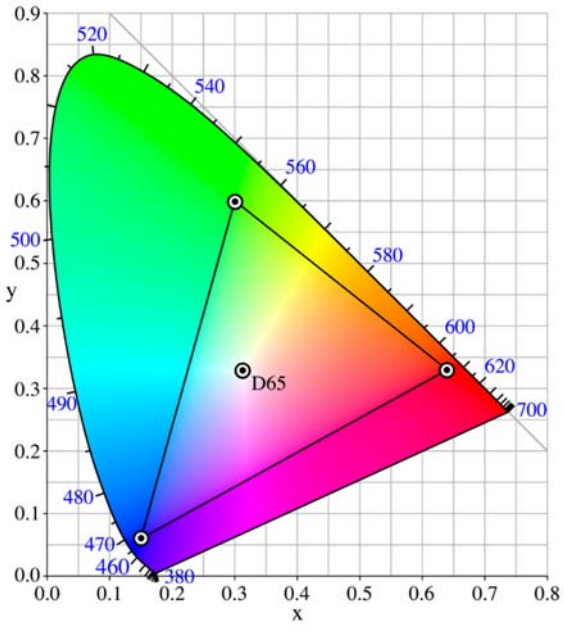


Рис. 1. Спектр цветов sRGB на полной хроматической диаграмме

4 Описание алгоритма визуализации в программе Matlab

Реализованный в среде Matlab математический аппарат позволяет получать координаты пространства RGB на основе программного обеспечения. Входными параметрами расчета является набор интенсивностей отраженных и прошедших порядков дифракции, а

также диапазон длин волн λ (массив wlv) и углов падения θ (массив theta). Данные об интенсивности в нулевом порядке содержатся в переменных res.R0 и res.T0.

Функции, необходимые для проведения колориметрических расчетов:

K = Colour_function_R0(w, r0, wl) — проводит интерполяцию по длинам волн для каждой спектральной кривой, получаем распределение коэффициента отражения $R(\lambda)$ или пропускания $T(\lambda)$ в формуле (1.1);

S = Power_D65(wl) — относительная спектральная мощность источника излучения $P(\lambda)$ в формуле (1.1);

xcolour = Colour_X_Curve(wl), ycolour = Colour_Y_Curve(wl), zcolour = Colour_Z_Curve(wl) — кривые сложения цветов в поле зрения 2° стандартного наблюдателя для XYZ системы измерения цвета МКО 1931 г., $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$.

В результате выполнения расчета образуется следующий набор параметров:

1) $(\bar{r},\bar{g},\bar{b})$— нелинейные координаты в цветовом пространстве sRGB (в первой строке содержатся значения координаты красного, во второй — зеленого, в третьей — синего);

2) map — цветовая карта в виде матрицы из трех столбцов, содержащих триплет цветовых координат.

Разработанное программное обеспечение позволяет визуализировать цветовое поведение образца плазмонной структуры в зависимости от угла наклона образца, что позволяет наглядно представить цвета структур и облегчает разработку дизайна оптического защитного элемента (ОЗЭ) на основе плазмонных структур.

Было проведено моделирование 2D ПДР, направленное на поиск плазмонного эффекта в пропускании, были исследованы наноструктуры со следующими вариантами рельефа:

1) перфорированная серебряная пленка, выполненная на полимерной подложке;

2) набор полимерных наноцилиндров, покрытых серебром;

3) посеребренный полимерный слой с отверстиями на полимерной подложке;

4) структуры с гексагональной упаковкой элементов.

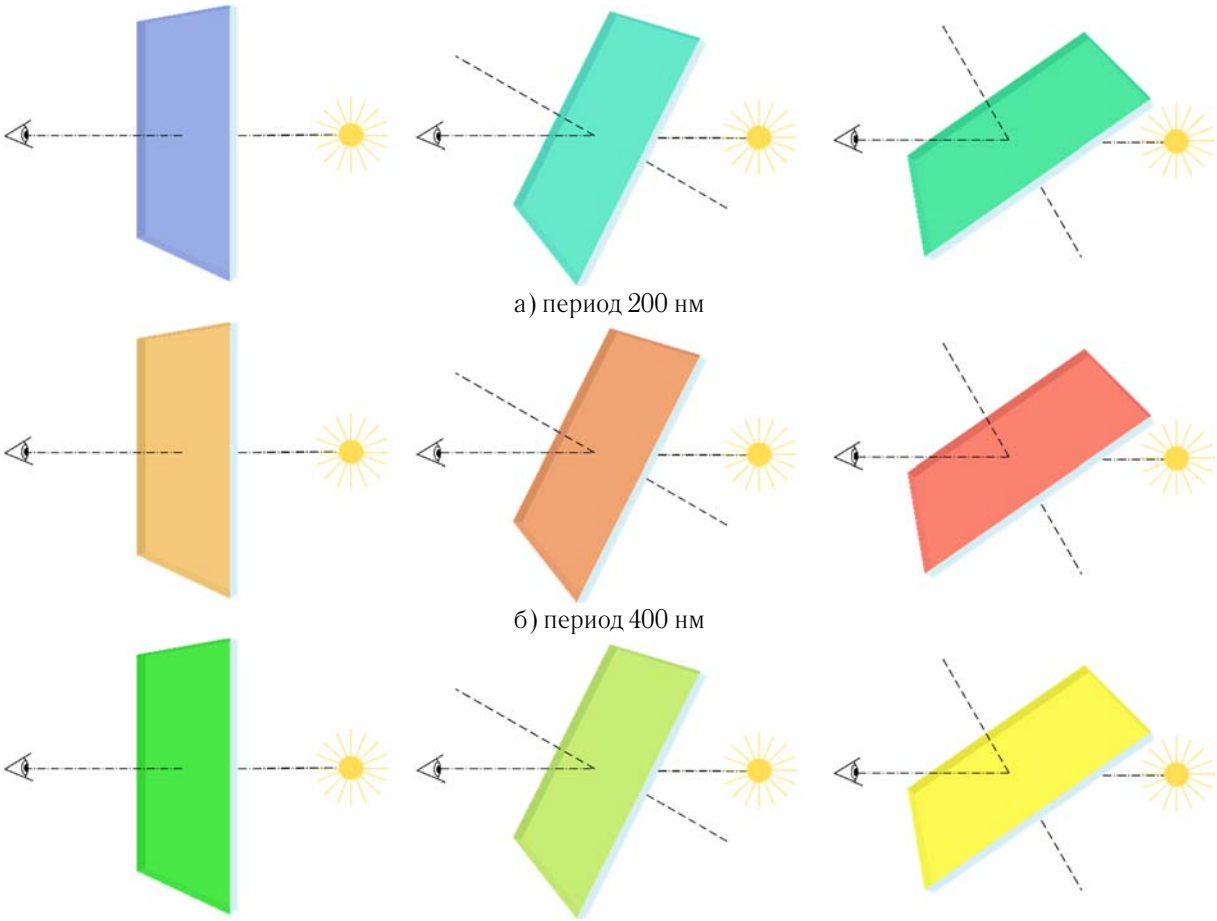
Были получены структуры, в которых наблюдается плазмонный эффект, заключающийся в изменении цвета структуры при изменении угла падения. В спектрах, показанных на рис. 2, наблюдается раздвоение полосы пропускания. С увеличением периода горизонтальная полоса во всем диапазоне углов смещается в красную область, а диагональная в область меньших углов падения. Их совместное влияние на цвет образца показано на соответствующих цветовых диаграммах. На структуре периодом 300 нм наблюдается изменение цвета с бирюзового на фиолетовый при угле падения выше 35°.

Табл. 1. Диапазон значений параметров исследуемых 2D ПДР

Параметр	**Диапазон значений**
Тип элементов	Стержни, отверстия
Упаковка элементов	Прямоугольная, гексагональная
Период	200–600 нм
Высота рельефа	60–120 нм
Толщина металлического покрытия	20–60 нм
Материалы подложки	полимер
Материалы покрытий	Серебро Ag
Способ нанесения покрытия	Со стенками, без стенок
Поляризация	TE, TM

Градацию цвета в зависимости от периода можно проследить, выбрав к рассмотрению один угол. Например, для угла падения 60° цвет преобразуется от пурпурного к зеленому, затем

к темно-оранжевому, и далее к темно-фиолетовому. Также исследовалось влияние толщины серебряного слоя, увеличивая который, получаем укорачивание полосы пропускания по углу.



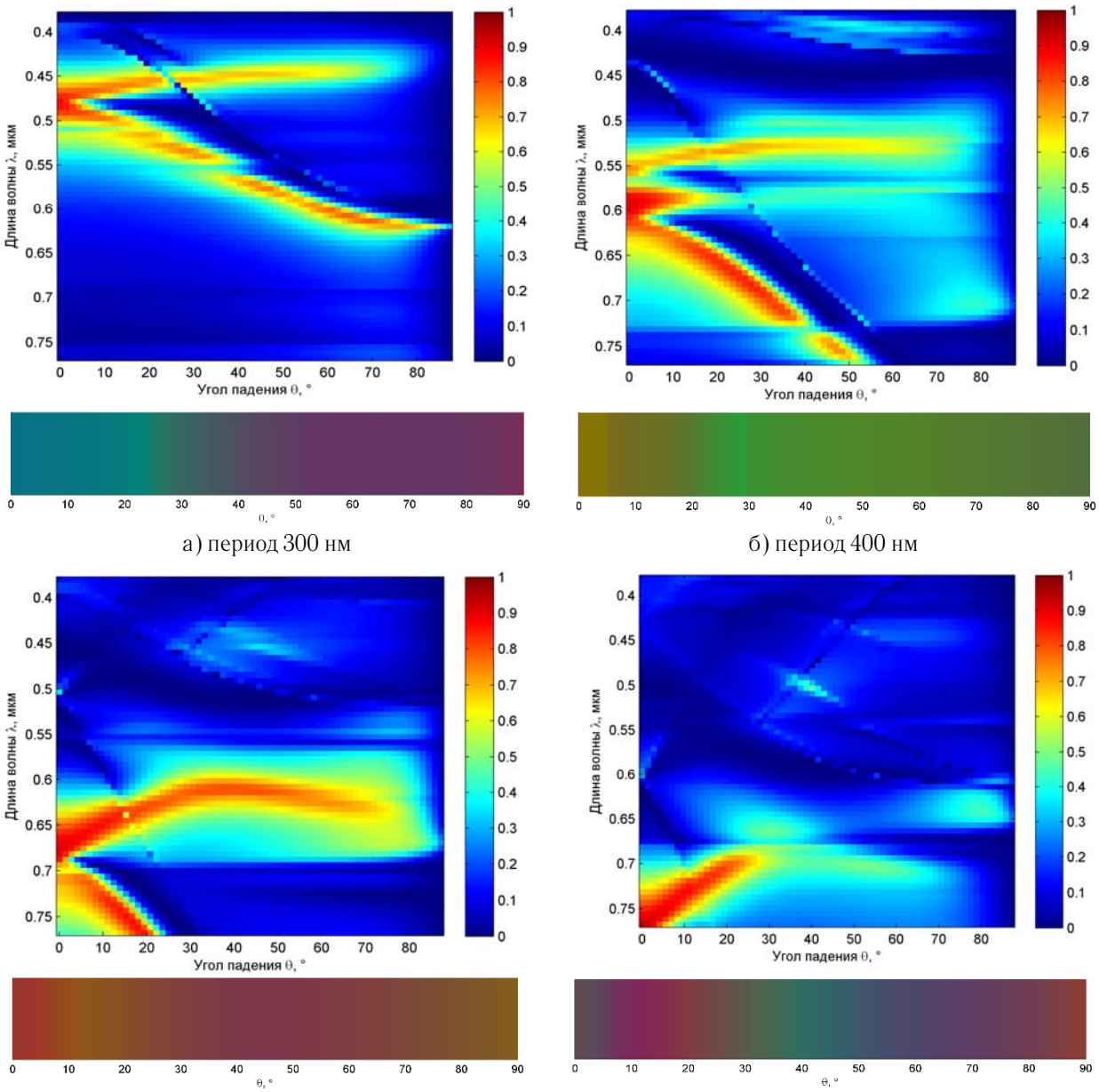
а) период 200 нм

б) период 400 нм

в) период 600 нм

Рис. 2. Схема изменения цвета 2D ПДР в проходящем свете при наклонении в обеих плоскостях

В результате выполненных исследований по анализу поведения ДПС в пропускании с варьированием геометрических параметров в широком диапазоне значений были выявлены следующие закономерности: 1) при рассмотрении структур в виде матрицы отверстий или ступеней, покрытых слоем серебра, значение оптимальной толщины слоя напыления металла находится в диапазоне от 20 до 40 нм; 2) при рассмотрении структур в виде матрицы перфорированных в слое серебра отверстий значение оптимальной толщины слоя металлического слоя находится в диапазоне от 60 до 120 нм, причем увеличение толщины покрытия привод к сужению полосы пропускания; 3) на ПС с гексагональной упаковкой элементов с меньшей периодичностью (200–300 нм) можно добиться эффекта сохранения цвета в широком диапазоне изменения угла наклона образца; 4) при изменении поляризации падающего излучения с ТМ на ТЕ полоса пропускания сужается, оставаясь в коротковолновой области, вместе с этим смещаясь в сторону меньших углов падения излучения.



а) период 300 нм

б) период 400 нм

в) период 500 нм

в) период 600 нм

Рис. 3. λθ-диаграммы пропускания 2D ПДР в ТМ-поляризованном излучении и их цветовые диаграммы

В целом найденные плазмонные эффекты на 2D ПДР приводят к изменению цвета образца на просвет в небольшом интервале цветов (от синего к зелёному, от зелёного к жёлтому или от оранжевого к красному, как показано на рис. 3) при наклонении образца в любой плоскости, при произвольном повороте в не поляризованном излучении. На рассчитанных λθ-диаграммах видно, что образец лучше в ТМ-поляризованном свете пропускает, в основном в сине-зелёной области. При повороте образца на 45° вокруг собственной оси диаграмма пропускания претерпевает лёгкие изменения. Максимум пропускания составляет порядка 0,7.

Далее были проведены экспериментальные измерения спектрально-угловой характеристики пропускания образцов на спектрофотометре AvaSpec-ULS2048 StarLine Versatile Fiber-optic Spectrometer. Результаты измерений представлены на рис. 2.

Было обнаружено несколько новых плазмонных эффекта: плазмонные эффекты на 2D ПДР в отражённом и проходящем излучении. Спектрально-угловые диаграммы с данными эффектами показаны на рис. 2.

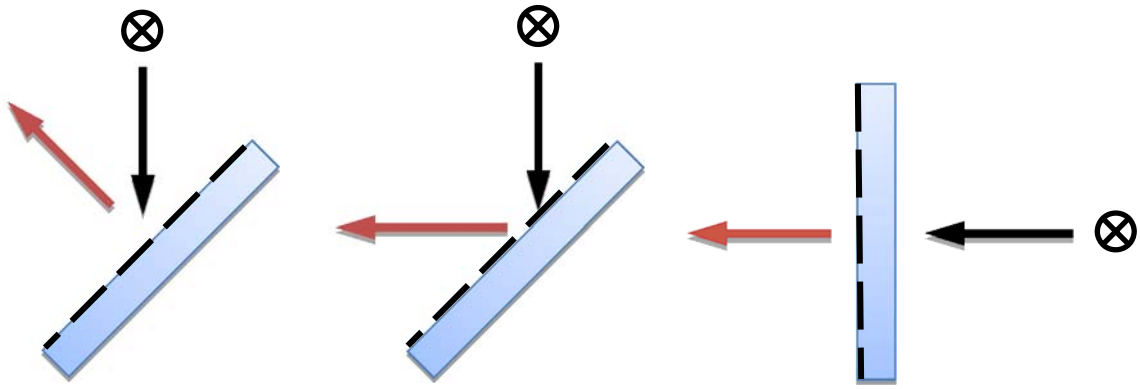
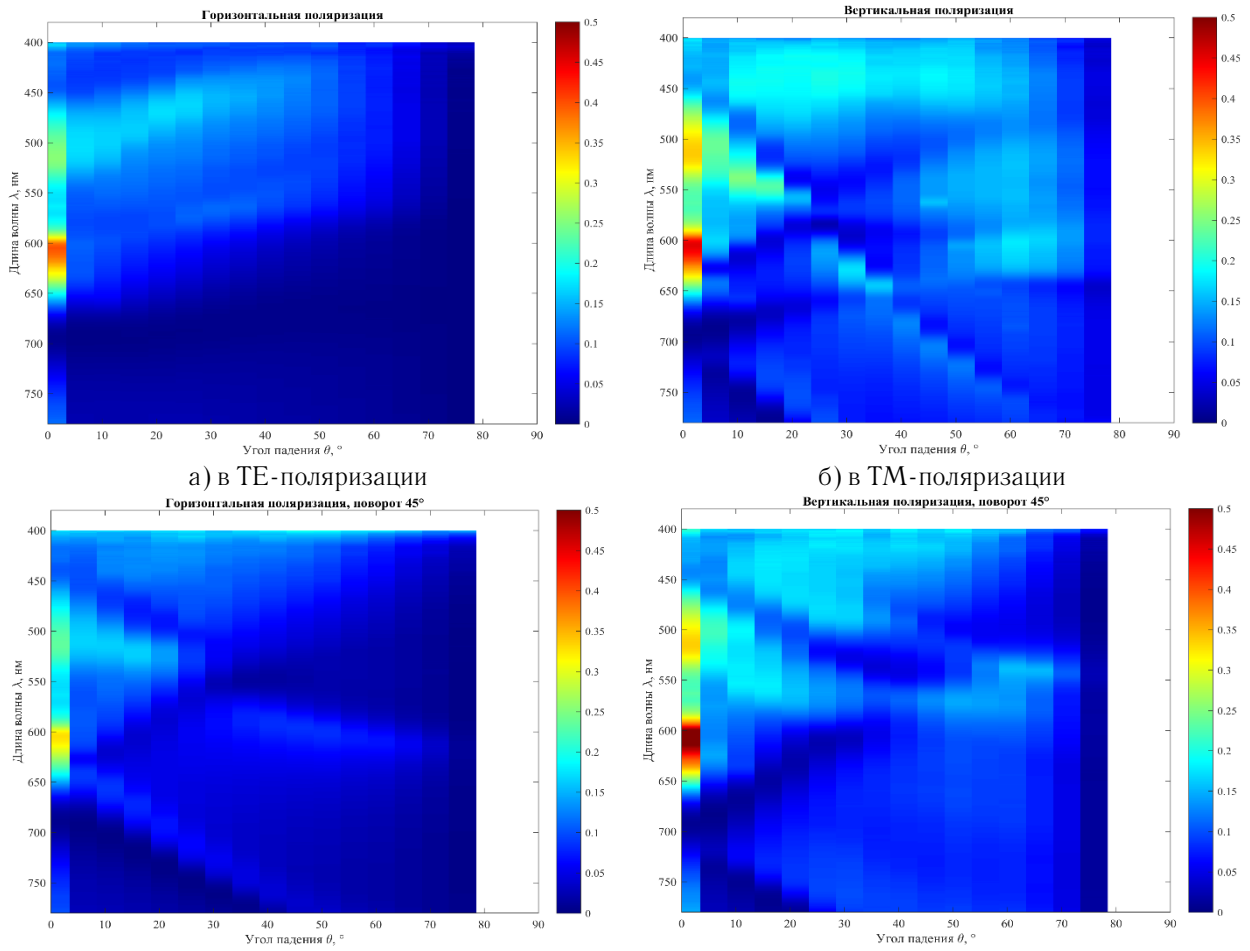


Рис. 4. Схема работы защитной голограммы в дифрагировавшем излучении в отражённом и в проходящем излучении

Результаты измерений в целом повторяют результаты моделирования, хотя полученный максимум пропускания не превышает 0,25 при наклонении образца. Характерные кривые незначительной аномалии коэффициента пропускания вдоль границ существования дифракционных порядков сохраняются.

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований 2D ПДР был сформирован проект нового защитного признака (ЗП) на основе 2D ПДР для получения нового оптического защитного элемента (ОЗЭ).

По сравнению с обычными защитными голограммами (ЗГ), защитный признак на основе данных плазмонных эффектах будет восприниматься иначе, поскольку виден не в дифрагировавшем излучении, а в отражённом и проходящем. Помимо этого, если на ЗГ радужный эффект проявляется в полном спектральном диапазоне от синего до красного цвета при малом повороте ЗГ, то эффект в проходящем излучении приводит к изменению окраски образца от синего до красного цвета при полном повороте на 60–90°.



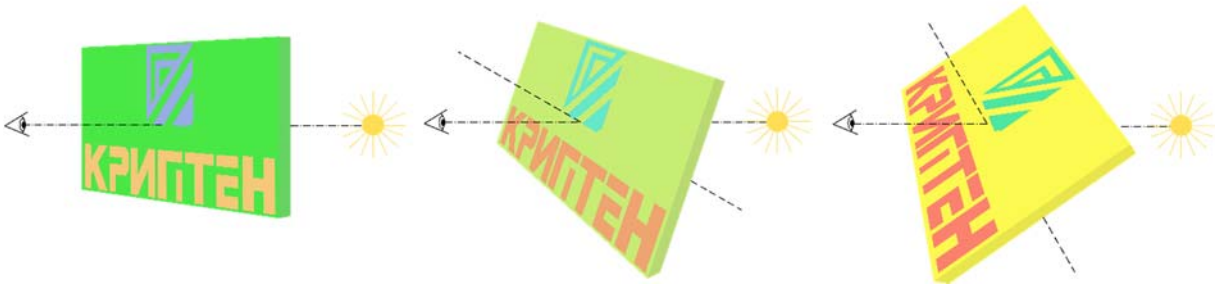
а) в TE-поляризации б) в TM-поляризации

в) образец повёрнут на 45° в TE-поляризации г) образец повёрнут на 45° в TM-поляризации

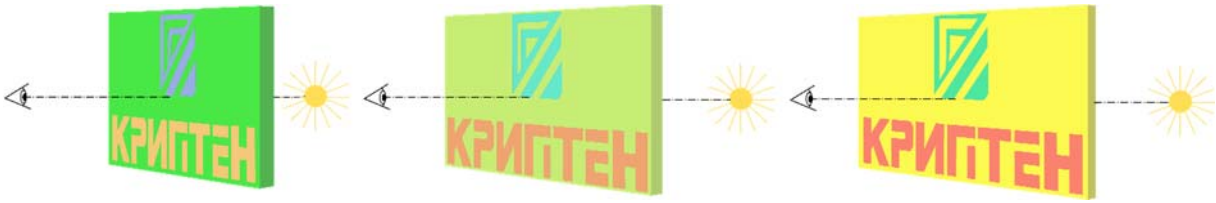
Рис. 4. λθ-диаграммы образца П6-9, измеренные на спектрофотометре

Цвета, в которых будет наблюдаться образец различны в проходящем и отражённом излучении. Ввиду меньшей зависимости спектра отражения от угла падения излучения, изображение в проходящем излучении будет более контрастно. Предположительно, возможно подобрать такие параметры 2D ПДР для дизайна ОЗЭ, что изображение в отражённом излучении будет скрытым, а в проходящем излучении будет наоборот проявляться. Это двухмерные структуры с гексагональной упаковкой стержней квадратных отверстий с периодом от 200 до 600 нм, высотой профиля 60 нм с серебряным напылением 60 нм.

Важным отличием данного ОЗЭ станет то, что он работает в обоих плоскостях: и в горизонтальной, и в вертикальной, поскольку основан на двумерных ПС. При наклоне ОЗЭ в любой плоскости будет проявляться изменение цвета. При этом при наклоне образца в диагональной плоскости, плазмонный эффект будет проявляться иначе — с иными оттенками переходящих цветов. Это отличает новый ОЗЭ как от ЗГ, так и от ОЗЭ на основе ОПС, поскольку последние основаны на одномерных структурах, и оба эффекта: дифракционный (радужный) и плазмонный — проявляются только при наклоне ЗГ и ОЗЭ в плоскости, перпендикулярной штрихам одномерной структуры.



а) наклон в вертикальной плоскости



б) наклон в горизонтальной плоскости

Рис. 5. Схема изменения цвета ОЗЭ на основе ДПС при наклонении в обеих плоскостях

На основе теоретических и экспериментальных исследований, проведённых во время выполнения первого этапа НИР были изготовлены и исследованы образцы защитного элемента (ОЗЭ) на основе пропускающих одномерной и двумерной плазмонной структуры (ПС) с дизайном «Криптен».

Дизайна образца, показанный на рис. 6, выполнен тремя ПС, различающихся периодом: 400, 500, 600 нм.

Рис. 6. Дизайн защитного элемента на основе пропускающей плазмонной структуры «Криптен»

Техническое задание на изготовление образца содержало следующие требования. Период ПС в области логотипа — 400 нм, в области фона — 500 нм, в области надписи «Криптен» — 600 нм. Высота рельефа должна быть в диапазоне 60±20 нм. Ориентация штрихов — ортогональная сторонам дизайна. Размер ОЗЭ 20×12 мм.

Заключение

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1) разработан проект ЗП на основе 2D ПДР с плазмонными эффектами для получения ОЗЭ в проходящем излучении;

2) найдены новые плазмонные эффекты на 2D ПДР в проходящем и в отражённом излучении;

3) разработано ПО для анализа 2D ПДР, позволяющее проводить исследования плазмонных эффектов и проектировать ОЗЭ на основе 2D ПДР;

4) разработано ПО для визуализации цветового поведения плазмонных структур, позволяющее упростить разработку дизайна ОЗЭ;

5) получены образцы 2D ПДР с плазмонным эффектом в проходящем излучении;

6) получен образец ОЗЭ на основе 2D ПДР с дизайном «Криптен» и плазмонным эффектом в проходящем излучении.

В связи с вышеперечисленными обстоятельствами литографический ОЗЭ на основе ОПС оказалась качественнее голографическом ОЗЭ на основе ДПС, хотя недостатки ОПС связанные с одномерностью сохранились.

Источники

[1] Cheng F. Structural color printing based on plasmonic metasurfaces of perfect light absorption / Fei Cheng, Jie Gao, Ting S. Luk & Xiaodong Yang // Science Reports. — 2015. —Vol. 5.

[2] Si G. Reflective plasmonic color filters based on lithographically patterned silver nanorod arrays / Guangyuan Si, Yanhui Zhao, Jiangtao Lv, Mengqian Lu, Fengwen Wang, Hailong Liu, Ning Xiang, Tony Jun Huang, Aaron J. Danner, Jinghua Teng, Yan Jun Liu // Nanoscale. — 2013. — Vol. 5. — P. 6243–6248.

[3] Yang Ch. Color-tuning method by filling porous alumina membrane using atomic layer depo-sition based on metal–dielectric–metal structure / Ch. Yang, W. Shen, Yue. Zhang, Zh. Ye, X. Zhang, Kan Li, Xu Fang, and Xu Liu // Applied optics. — 2014. — Vol. 53. — №4.

[4] Zapata-Rodríguez C.J. Metasurfaces for colour printing / Carlos J. Zapata-Rodríguez, Juan J. Miret, Pedro Rodríguez-Cantó, Guillermo Muñoz-Matutano, Juan P. Martínez-Pastor, Rafael Abargues, David Pastor, Michael Kaiser, and Christoph Hohle // 16th International Conference on Transparent Optical Networks. — 2014. — Tu.A5.6

[5] Горбунова Е.В. Типовые расчеты по колориметрии источников излучения / Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов // Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО. — 2014.

The prospects of obtaining new visual effects in the security holograms using nano-plasmonic structures and the possibility of their integration into the traditional serial thin-film technology

S.B. Odinokov[1], A.Y. Zherdev[1], D.S. Lushnikov[1], M.V. Shishova[1], A.V. Smirnov[2], B.V. Akimov[2]
[1] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[2] JSC “RPC “Krypten”, Dubna, Russia

The report analyzes the options for calculation and production of plasmonic optical nanostructures in the form of one-dimensional and/or two-dimensional plasmonic gratings (1D-2D PDR) for its incorporation as an optical security element in the security hologram, manufactured both in standard 'roll embossing technology , and in the flat technology UV embossing .

П.6 Составные объективы из квазидифракционных линз

Р.В. Скиданов, Н.Л. Казанский, А.А. Морозов, С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский
Институт систем обработки изображений Российской академии наук — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Самара, Россия
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Рассмотрена конструкция составного изображающего объектива из двух гармонических линз. Показано, что в этом случае возможно создание высококачественного изображающего объектива.

Введение

С момента появления первой дифракционной линзы предпринимались попытки использовать ее для формирования изображения. Однако высокая хроматическая аберрация дифракционных линз не позволяла получить изображения сколь-нибудь приемлемого качества [1], хотя и позволяет производить спектральный анализ формируемых изображений [2]. Однако это сопряжено с использованием алгоритмов с высокой вычислительной сложностью. Дифракционная оптика имеет много преимуществ перед рефракционной и это вызывает постоянные попытки получить дифракционные оптические системы, дающие изображение приемлемого качества [3, 4]. Выходом в сложившейся ситуации является использование гармонических (квазидифракционных) линз [5, 6]. Такая линза действительно позволяет уменьшить величину хроматической аберрации в несколько раз [6]. Однако для того чтобы получить хроматическую аберрацию сравнимую с хроматической аберрацией хотя бы одиночной рефракционной линзы необходимо делать гармонические линзы со слишком высоким микрорельефом (порядка 50 мкм), что технологически трудно осуществимо, и к тому же влечет за собой увеличение погрешности изготовления. В настоящей работе рассматривается система, состоящая из двух гармонических линз, позволяющая получить хроматические аберрации даже несколько меньшего размера, чем в одиночной рефракционной линзе с теми же параметрами.

Изображающий объектив из двух гармонических линз.

Объектив состоит из гармонической линзы 1, гармонической линзы 2.

Указанная задача достигается за счет того, что используется изображающий объектив, состоящий из двух дифракционных оптических элементов, согласно изобретению, каждый оптический элемент выполнен в виде дифракционной гармонической линзы с высотами рельефа, которые заданы формулами

$$h_1 = \frac{p\lambda_1}{n-1},$$

$$h_2 = \frac{p\lambda_2}{n-1},$$

где h_1 — высота рельефа гармонической дифракционной линзы для длины волны λ_1, h_2 — высота рельефа гармонической дифракционной линзы для длины волны λ_2.

Длины волн λ_1 и λ_2 связаны соотношением

$$\lambda_2 = \frac{p\lambda_1}{p + 1/2},$$

где p — коэффициент кратности высоты рельефа гармонической линзы.

На рис. 1 представлена оптическая схема объектива.

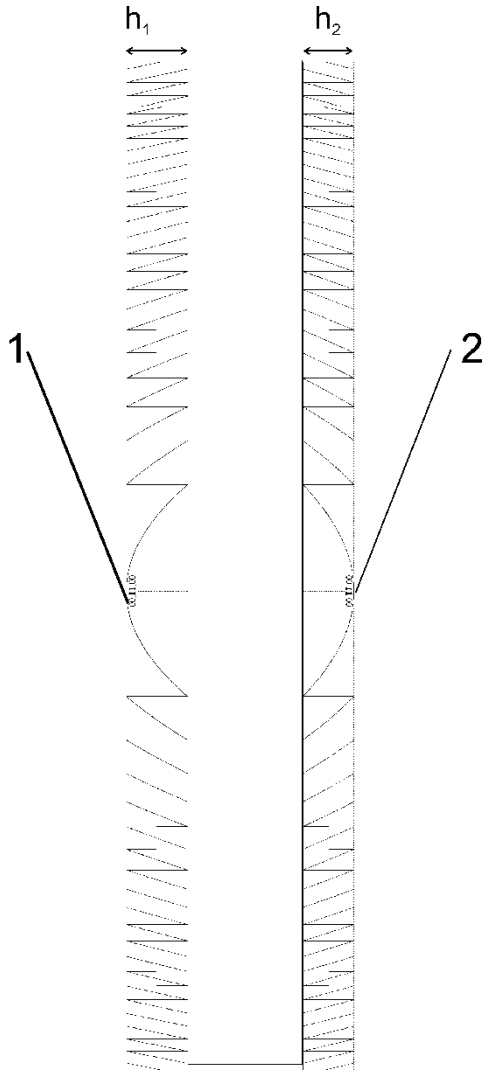


Рис. 1. Изображающий объектив из двух гармонических линз

На рис. 2 представлены примерные графики зависимости фокусных расстояний каждой гармонической линзы в отдельности и системы из двух гармонических линз.

Гармоническая линза 1 и гармоническая линза 2 за счет того, что их фокусные расстояния зависят от длины волны периодически и в противофазе друг относительно друга в совокупности образуют фокусирующую систему с половинным фокусным расстоянием, которая почти не зависит от длины волны (рис. 2).

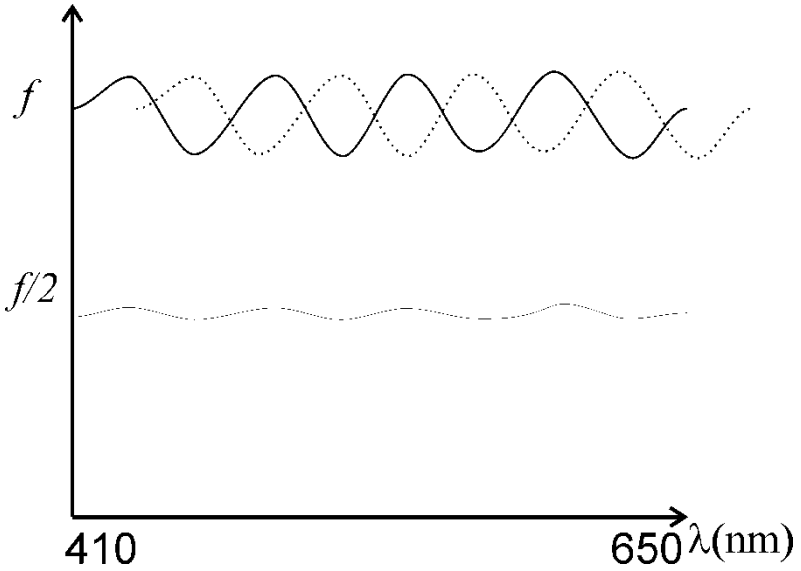


Рис. 2. Примерные графики изменения фокусного расстояния линз 1 (сплошная линия вверху), 2 (точечная линия вверху) и составного объектива (линия внизу)

Как видно из рис. 2. фокусное расстояние системы из двух линз изменяет по сравнению со своим абсолютным значением.

Для изготовления гармонических линз с $p = 6$ была использована технология записи ультрафилолетовым лазером по резисту. При этом основное внимание уделялось точности формирования микрорельефа. На рис. 3 показана профилограмма изготовленной линзы (плавная линия) с наложенной на нее кривой идеального профиля (ломаная линия).

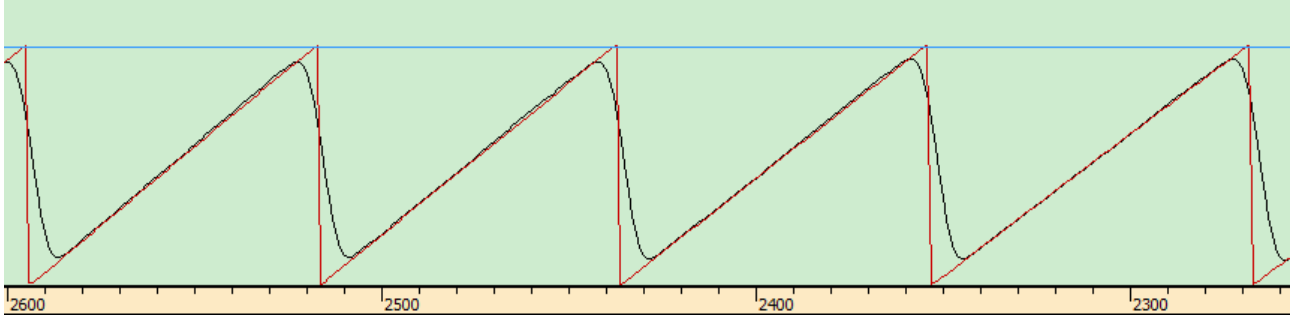
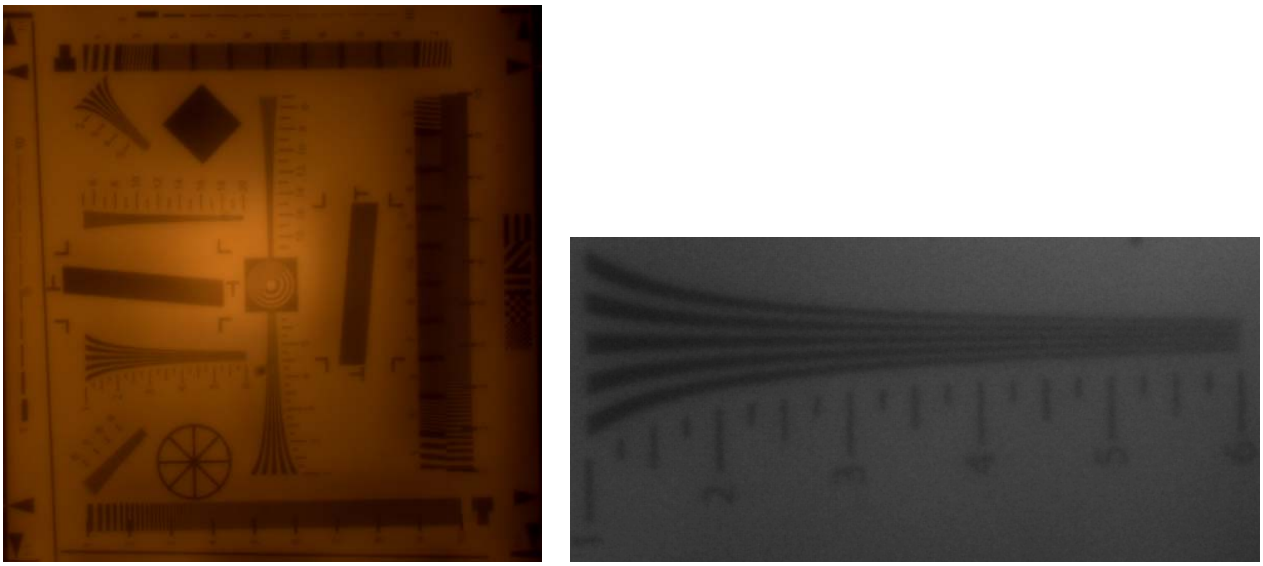


Рис. 3. Профилограмма изготовленной линзы (плавная линия) с наложенной на нее кривой идеального профиля (ломаная линия)

Как видно из рис. 3 основные отклонения микрорельефа наблюдаются в точках резкого изменения профиля. В остальных местах отклонения составляют менее 50 нм что соответствует оптическому качеству поверхности (менее $\lambda/10$).

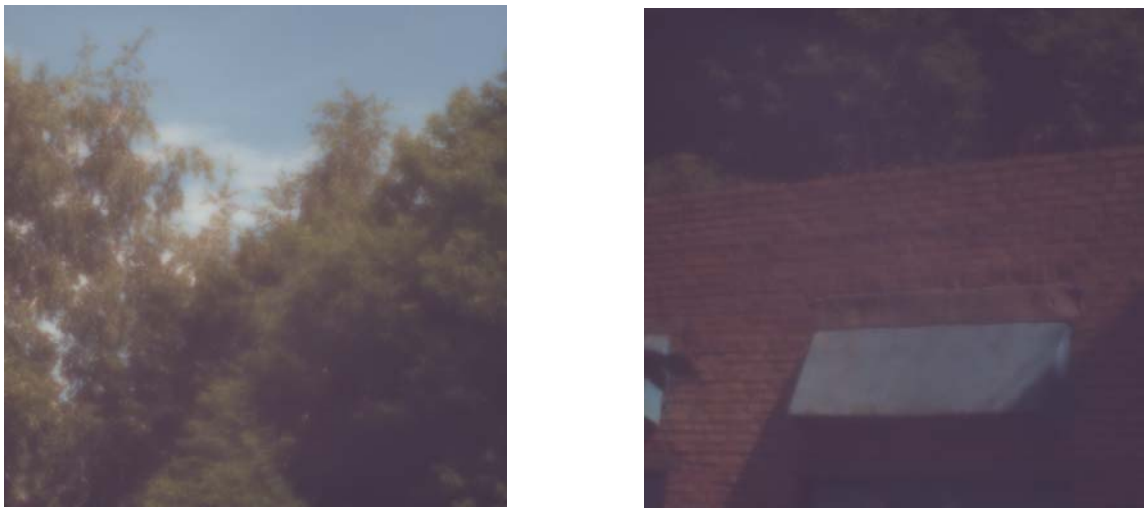
С помощью двух линз изготовленных по этой технологии был собран объектив с фокусным расстоянием 50 мм, который был использован с ПЗС матрицей с размером чувствительного элемента 5,5 мкм. На рис. 4 представлены изображения, полученные с помощью этого объектива.



а) б)

Рис. 4. Изображение графической таблицы целиком (а), увеличенный фрагмент (б)

Из рис. 4 видно, что объектив позволяет получить разрешение до 50 мм$^{-1}$, что сравнимо с разрешением рефракционных объективов.



а) двухцветные б) трехцветные

Рис. 5. Изображения реальных объектов, полученные на составном объективе

Заключение

Рассмотрена концепция составного объектива из гармонических линз. Показано, что лабораторный макет такого объектива позволил получить разрешение до 50 мм$^{-1}$.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-19-00114).

Источники

[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] Скиданов Р.В. Исследование изображающего спектрометра на основе дифракционной линзы / Р.В. Скиданов, В.А. Бланк, А.А. Морозов // Компьютерная оптика. — 2015. Том 39. — №2. — С. 218–223.
[3] Грейсух Г.И. Принципы построения проекционных и фокусирующих оптических систем с дифракционными элементами / Г.И. Грейсух, И.М. Ефименко, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. — 1987. — Том 1. — С. 114–116.
[4] Greisukh G. I. Aberration properties and performance of a new diffractive-gradient-index high-resolution objective / G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, S. A. Stepanov // Applied Optics. — 2001. — Vol. 40, — №16. — P. 2730–2735.
[5] Sweeney D.W. Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // Applied Optics. — 1995. — Vol. 34. — №14. — P. 2469–2475.
[6] 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.

Composite lenses of harmonic lenses

R.V. Skidanov, N.L. Kazanskiy, A.A. Morozov, S.N. Khonina, S.G. Volotovsky
Image Processing Systems Institute — Branch of the Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia
Samara National Research University, Samara, Russia

We have considered the design a imaging composite lens of two harmonic lenses. It was shown that in this case it is possible to create high quality imaging lens.

П.7 Интерферометрические методы контроля сферической, асферической и нетипичной оптики с применением синтезированных голограмм

А.Г. Полещук, Р.К. Насыров
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Введение

В настоящее время достигнут существенный прогресс в области изготовления и контроля оптических поверхностей с нанометрической точностью. Обычный интерферометр обеспечивает контроль плоских или сферических поверхностей. Для контроля поверхностей сложной формы, таких как: асферические, цилиндрические, конические, торические, а в общем случае произвольной (или нетипичной) формы (Freefrom surfaces), необходимо использовать корректоры волнового фронта [1]. В качестве таких корректоров наиболее часто используют синтезированные голограммы (СГ). Однако применение СГ для контроля нетипичных поверхностей имеет ряд особенностей. Возможны несколько вариантов применения СГ:

СГ выполняет роль корректора, преобразуя волновой фронт интерферометра в асферический [2].

СГ выполняет роль имитатора контролируемой поверхности [3,4].

СГ обеспечивает точную юстировку измерительной схемы [5].

В настоящей работе представлены результаты разработки оптических схем, методов расчета и применения СГ для контроля формы асферических, цилиндрических и произвольных оптических поверхностей. Рассмотрены методы изготовления прецизионных СГ с использованием круговой лазерной записывающей системы (КЛЗС) типа CLWS-300IAE [6].

Контроль асферических поверхностей

Для контроля асферики применяются как осевые, так и внеосевые СГ. Осевые СГ проще в расчете, юстировке и могут быть изготовлены с высокой точностью с помощью КЛЗС или методами алмазного точения [7]. На рис. 1а приведен пример контроля асферического зеркала Большого азимутального телескопа (БТА) с помощью изготовленной в ИАиЭ СО РАН осевой СГ — дифракционного корректора. На этом же рисунке показан увеличенная часть схемы с внеосевым имитатором зеркала, который используется для аттестации корректора. Внеосевое выполнение имитатора обеспечивает отсутствие паразитных бликов при аттестации (рис. 1б).

Контроль цилиндрических поверхностей. Основная проблема при контроле цилиндрических поверхностей — это фильтрация автоколлимационных бликов [8]. Для контроля цилиндрических поверхностей с большой числовой апертурой, предложено использовать интерферометр Физо с эталонным объективом (ЭО) [9]. В этом случае СГ устанавливается перпендикулярно оптической оси в сходящемся пучке света (рис. 2а). Для юстировки основной СГ используется вспомогательный отражательный СГ (рис. 2б). Преимуществом является увеличение периода дифракционной структуры СГ в два раза и расположение оптических компонентов вдоль оптической оси.

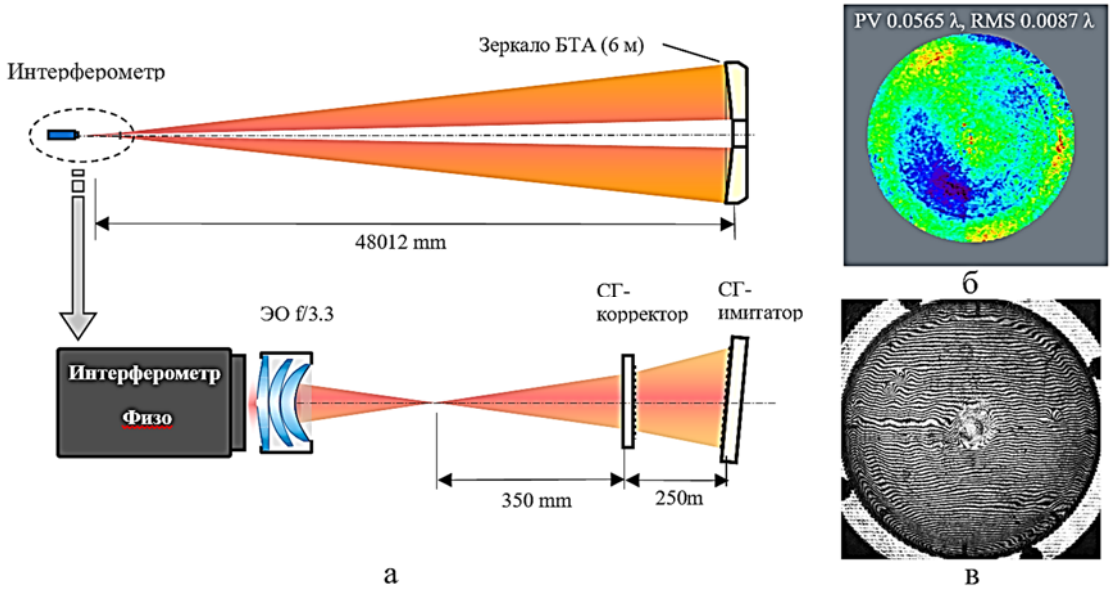


Рис. 1. Схема контроля 6-м зеркала БТА и аттестации корректора (а), фазовая карта системы корректор-имитатор (б) и интерферограмма поверхности зеркала в процессе полировки (в)

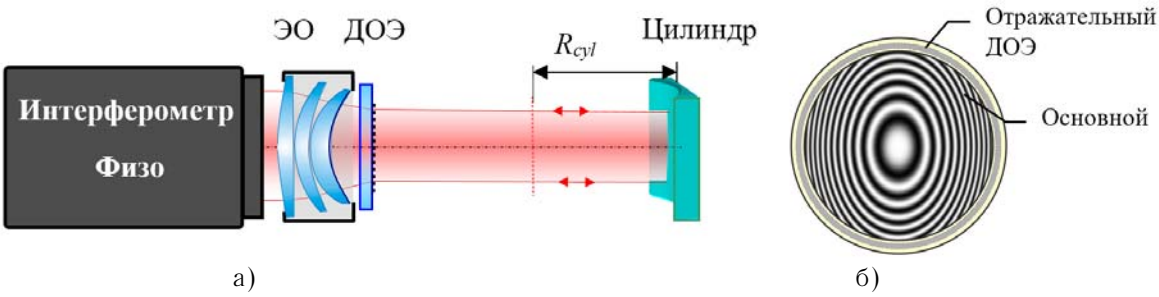


Рис. 2. Оптическая схема контроля цилиндрической поверхности (а) и вид фазовой функции СГ в 100-м дифракционном порядке (б)

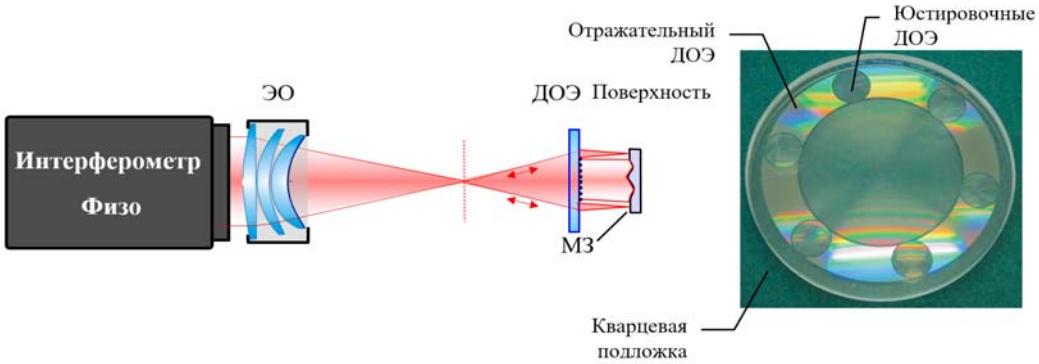
Контроль поверхностей свободной формы

Сложные оптические поверхности не имеют осевой симметрии и задаются в виде двумерной карты или описываются полиномами. Имеются две основные особенности при разработке таких оптических систем:

1) расчет фазовой функции СГ требует существенных объемов вычислений. Объем данных достигает десятков и сотен Гб для СГ диаметром более 100 мм;

2) для обеспечения погрешности менее 1/10 длины волны, оптические компоненты (рис. 3а) должны быть установлены в расчетные положения вдоль осей x, y, z с погрешностью менее 1 мкм и углов α_x, α_y, α_z порядка 1″.

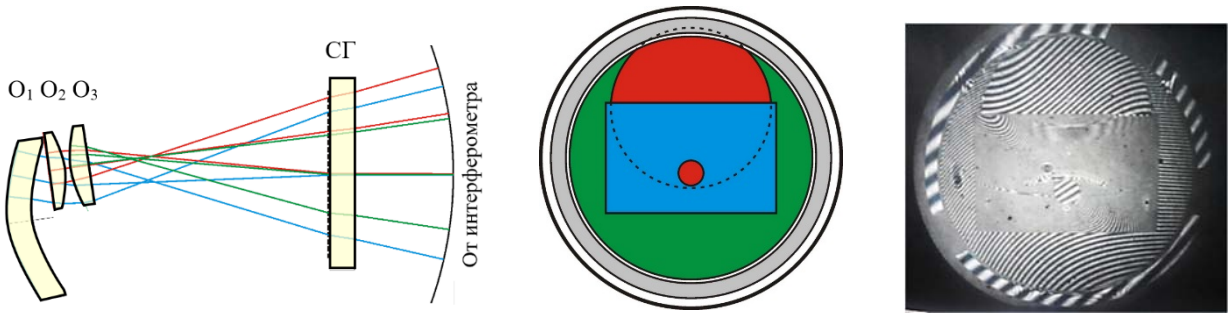
Для обеспечения такой точности, основная СГ дополняется юстировочными ДОЭ (рис. 3б) которые фокусируют свет в заданные точки пространства. На контролируемой поверхности изготавливались сферические микрозеркала (МЗ). Оптическая схема рассчитывалась таким образом, чтобы световой поток сфокусированный дополнительными СГ отражался от микрозеркал строго назад в интерферометр. Таким образом, по нескольким интерферограммам можно однозначно выставить контролируемую поверхность относительно СГ.



а) б)

Рис. 3. Оптическая схема (а) контроля и вид изготовленной СГ(б)

Контроль сборки сложных оптических систем. Одной из проблем в оптическом приборостроении является сборка и настройка многокомпонентных оптических систем, как показано в примере на рис. 4а. Были разработаны СГ, которые представляют собой несколько голограмм, изготовленных на одной подложке (рис. 4б) в одном технологическом цикле. При этом, каждая голограмма рассчитывается таким образом, чтобы получить интерференционную картину от одной из поверхностей линз O1, O2 и O3 системы. На рис. 4б цвет дифракционной структуры соответствует цвету контролируемой поверхности. Таким образом, при идеальной настройке системы на интерферограмме возникнет поле равномерной интенсивности на всех структурах одновременно. В противном случае, возникнет интерференционная картина, которую можно проанализировать и определить направление в котором следует сместить тот или иной оптический компонент (рис. 4в).



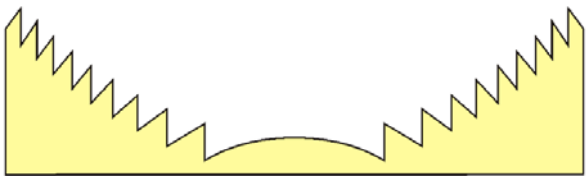
а) б) в)

Рис. 4. Схема контроля сложно оптической системы (а), вид ДОЭ (б) и типичная интерферограмма в процессе юстировки (в)

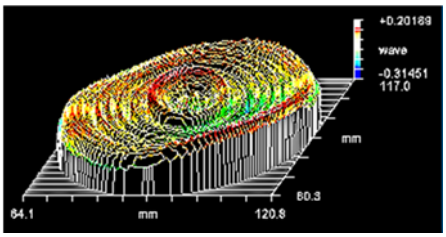
Контроль асферо-дифракционных поверхностей

Германиевые линзы с асферо-дифракционной поверхностью часто используются в тепловизорах. Дифракционная часть служит для коррекции хроматических аберраций ИК излучения. На рис. 5 приведен характерный вид такой поверхности (на рисунке структура выполнена не в масштабе) и фазовая карта. Диаметр поверхности может составлять несколько десятков миллиметров, при этом глубина дифракционной структуры достигает нескольких микрон. Проблема контроля таких поверхностей заключается в том, что требуется тщательная настройка системы измерения. Если при отклонении формы обычных поверхностей от теоретической на интерферограмме возникает единая система полос, которые можно проанализировать, то при контроле асферо-дифракционной структуры на каждой дифракционной зоне возникает своя интерференционная картина. При большой погрешности

контролируемой поверхности интерферограмма «рассыпается» и программное обеспечение интерферометра некорректно сшивает фазовую карту.



а)



б

Рис. 5. Пример асферо-дифракционной структуры (не в масштабе) (а) и фазовая карта асферо-дифракционной поверхности (б)

Заключение

Разработаны интерферометрические схемы контроля асферических, цилиндрических, асферо-дифракционных поверхностей, поверхностей свободной формы, а также многокомпонентных оптических систем. Разработаны методы расчета и изготовления СГ. Показано, что при помощи вспомогательных юстировочных СГ можно контролировать положение СГ в пространстве с точностью нескольких угловых секунд.

Данная работа поддержана грантом РФФИ ОФИ-М № 4-29-07227.

Источники

[1] Chang Y.-C. Analysis of phase sensitivity for binary computer-generated holograms / Y.-C. Chang, P. Zhou, J.H. Burge // Appl. Opt. — 2006. — 45. — P. 4223–4234.
[2] Wyant J.C. Using computer-generated holograms to test aspheric wavefronts / J.C. Wyant and V.P. Bennett // Appl. Opt. — 1972. — 11. — P. 2833–2839.
[3] Ларионов Н.П. Имитатор главного зеркала телескопа на основе синтезированной голограммы / Н.П. Ларионов, А.В. Лукин, Р.А. Рафиков // ОМП. — 1980. — №1. — С. 39–40.
[4] Burge J.H. Measurement of 6.5 and 8.4-meters aspherical mirrors shape by computer generated holograms / J.H. Burge, V.V. Cherkashin, V.P. Koronkevich, A.G. Poleshchuk // VI Международная конференция «Прикладная оптика» (октябрь 2004 г., Санкт-Петербург). — 3. — С. 203–207.
[5] Полещук А.Г. Совмещение дифракционных и рефракционных компонентов в оптических системах // Автометрия. — 1985. — 6. — С. 27–31.
[6] 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. // Appl. Opt. — 1999. — 38. — P. 1295–1301.
[7] Lei L. Fabrication of diffractive optics by use of slow tool servo diamond turning process / L. Lei, Y. Allen, H. Chunning etc. // Opt. Eng. — 2006. — Vol. 45. — №11. — P. 113401.
[8] URL: http://www.diffraction.com/cylinder.php.
[9] Poleshchuk A.G. Interferometric testing of steep cylindrical surfaces with on-axis CGHs / A.G. Poleshchuk, R.K. Nasyrov, J.-M. Asfour // Компьютерная оптика. — 2016.

Interferometric methods to control spherical, aspherical optics and atypical with synthesized holograms

A.G. Poleshchuk, R.K. Nasyrov
Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The application problems of computer-generated holograms (CGH) for precise testing of aspherical, asphere-diffractive, multi-component and free form optical surfaces are discussed. The results of development of methods of design, calculation and fabrication of CGHs are presented.

П.8 Круговая делительная техника АО «НПО «ГИПО»: современное состояние, проблемы и перспективы

А.В. Лукин[1], А.Н. Мельников[1], Ю.П. Чугунов[1], А.П. Демин[2], Ю.Е. Семенов[3]
[1] АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия
[2] ООО «ЭКСКОП», Казань, Россия
[3] ООО «ИПК «Халтек», Ульяновск, Россия

Применение осевых синтезированных голограмм обеспечило кардинальное решение проблемы контроля всех видов асферических оптических поверхностей, используемых в оптическом и оптико-электронном приборостроении. Существует два подхода в технологии получения осевых синтезированных голограмм: «резцовый» [1, 2] — нанесение штриховых структур с помощью специально заточенного алмазного резца в тонком металлическом слое и «световой» [1, 3] — с помощью сфокусированного лазерного пучка в тонком светочувствительном слое. Опыт ГИПО показал, что «резцовый» вариант имеет ряд преимуществ, главные из которых:

- простота реализации при нанесении штриховых структур на выпуклые и вогнутые светосильные поверхности;
- более высокая «разрешающая» способность (ширина лезвия алмазного резца может быть доведена до величины порядка нескольких десятков ангстрем);
- надежность непрерывного функционирования оптико-электронной системы управления технологическим процессом нанесения штрихов (более 10 суток).

В ГИПО «резцовый» вариант реализуется на уникальных круговых делительных машинах типа МДА-9, МДА-10 и МДГ 500, размещенных в Заглубленной лаборатории дифракционных решеток на глубине 12 м, где обеспечены высокая степень термостабилизации и виброзащиты.

В устройстве круговых делительных машин МДА-9 и МДА-10 радиальное перемещение подложек осевых синтезированных голограмм осуществляется линейным пьезоэлектрическим приводом, управляемым от персонального компьютера. Круговые делительные машины МДА-9 и МДА-10 позволяют изготавливать осевые синтезированные голограммы диаметром до 230 мм. Круговая делительная машина МДГ-500 предназначена для нарезания осевых синтезированных голограмм диаметром до 500 мм и находится на стадии модернизации.

В докладе рассматриваются возможные пути решения актуальных проблем усовершенствования технологии и оборудования для нанесения дифракционных структур осевых синтезированных голограмм на крупноформатных [4] выпуклых и вогнутых светосильных рабочих поверхностях, предназначенных, в частности, для прецизионных юстировочных операций в телескопостроении.

Источники

[1] Буйнов Г.Н. Голографический интерференционный контроль асферических поверхностей / Г.Н. Буйнов, Н.П. Ларионов, А.В. Лукин, К.С. Мустафин, Р.А. Рафиков // Оптико-механическая промышленность. — 1971. — №4. — С. 6–11.

[2] Агачев А.Р. Синтезированная голограммная оптика / А.Р. Агачев, Н.П. Ларионов, А.В. Лукин, Т.А. Миронова, А.А. Нюшкин, Д.В. Протасевич, Р.А. Рафиков // Оптический журнал. — 2002. — Том 69. — №12. — С. 23–32.

[3] Коронкевич В.П. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение / В.П. Коронкевич, Г.А. Ленкова, И.Г. Пальчикова, А.Г. Полещук, А.Г. Седухин, Е.Г. Чурин, Ю.И. Юрлов // Автометрия. — 1985. — №1. — С. 4–25.

[4] Baloev V.A. Alignment Control of Two Mirror Telescopes Using a System of Annular Computer-Generated Holograms / V.A. Baloev, V.P. Ivanov, N.P. Larionov, A.V. Lukin, A.N. Melnikov, A.F. Skochilov, A.M. Uraskin, Yu.P. Chugunov // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2014. — Vol. 23. — №2. — P. 104–110.

Circular ruling engines available at JSC "NPO "GIPO": current state, problems and future trends

A.V. Lukin[1], A.N. Melnikov[1], Yu.P. Chugunov[1], A.P. Demin[2], Yu.E. Semenov[3]
[1] JSC "NPO "State Institute of Applied Optics", Kazan, Russia
[2] LLC "EKSKOP", Kazan, Russia
[3] LLC "IPK "Khaltek", Ulyanovsk, Russia

The application of on-axis computer-generated holograms has provided for a cardinal solution of problems of controlling aspherical optical surfaces of all types, that are used in optical and optoelectronic engineering. There are two approaches in the process of manufacturing on-axis computer-generated holograms: a "cutting tool" method [1, 2], when groove structures are ruled by a specially sharpened diamond cutting tool in the thin metal layer, and a "light beam" method [1, 3], when these structures are formed by means of a focused laser beam in a thin light-sensitive layer. Practices gained at GIPO reveals that a "cutting tool" method has a number of essential advantages, which include:

- it is easy to rule groove structures on convex and concave high-aperture surfaces;
- a higher "resolution" (the diamond cutting tool edge width may be of the order of magnitude of several tens of angstrom units);
- a reliable continuous operation of the optoelectronic system designed to control the process of ruling grooves (over 10 days).

At GIPO the "cutting tool" method is implemented on unique circular ruling engines (of types MDA-9, MDA-10 and MDG-500), located as deep as 12 meters inside an underground laboratory of diffraction gratings, where high levels of thermostabilization and vibroprotection are secured.

In the circular ruling engines of types MDA-9 and MDA-10 the radial displacement of substrates of on-axis computer-generated holograms is effected by means of a computer-aided linear piezoelectric actuator. The circular ruling engines of types MDA-9, MDA-10 allow to make on-axis computer-generated holograms up to 230 mm in diameter. The MDG-500 circular ruling engine is designed to rule on-axis computer-generated holograms up to 500 mm in diameter and this engine is in the process of its upgrading.

The paper considers some possible ways of solving the actual problems of the process and equipment updating intended to rule diffraction structures of on-axis computer-generated holograms on large-sized [4] convex and concave high-aperture operating surfaces which are intended for precision alignment operations in the telescopic system manufacturing, in particular.

References

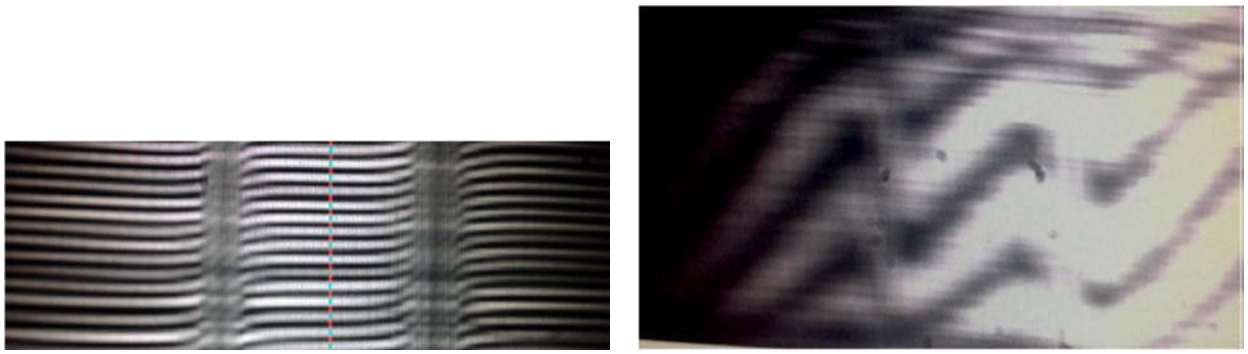
[1] Buinov G.N. Holographic interferometric control of aspherical surfaces / G.N. Buinov, N.P. Larionov, A.V. Lukin, K.S. Mustafin, R.A. Rafikov // Opt. Mekh. Prom. — 1971. — №4. — P. 6–11 (in Russian).

[2] Agachev A.R. Computer-generated hologram optics / A.R. Agachev, N.P. Larionov, A.V. Lukin, T.A. Mironova, A.A. Nyushkin, D.V. Protasevich, R.A. Rafikov // Optichesky Zhurnal. — 2002. — Vol. 69. — №12. — P. 23–32 (in Russian).
[3] Koronkevich V.P. Kinoform optical elements: design methods, production technique, applications / V.P. Koronkevich, G.A. Lenkova, I.G. Palchikova, A.G. Poleshchuk, A.G. Sedukhin, E.G. Churin, Yu.I. Yurlov // Avtometria. — 1985. — №1. — P. 4–25 (in Russian).
[4] Baloev V.A. Alignment Control of Two Mirror Telescopes Using a System of Annular Computer-Generated Holograms / V.A. Baloev, V.P. Ivanov, N.P. Larionov, A.V. Lukin, A.N. Melnikov, A.F. Skochilov, A.M. Uraskin , Yu.P. Chugunov // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2014. — Vol. 23. — №2. — P. 104–110.

П.9 Применение цифровой голографии в голографической интерферометрии

В.Ю. Венедиктов[1, 2], Д.В. Венедиктов[2], С.А. Пулькин[2], А.А. Севрюгин[1], И.М. Турсунов[1]
[1] Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Достижения в области цифровой голографии и новые технические средства (разнообразные матричные приемники света, матричные фазовые модуляторы и т.д.) вернули в повестку дня давно известные методы голографической интерферометрии и, в частности, разнообразные методы управления параметрами интерференционной картины [1]. Ранее мы показали, что сочетание цифровых и аналоговых приемов, недоступное ранее, но рутинное сегодня, позволяет осуществлять т.н. усиление голограмм (или повышение чувствительности интерферограмм) [2], корректировать искажения, вносимые элементами интерферометра [3] и т.п. В докладе будет дан обзор этих результатов.



а) б)

Рис. 1. Крюки Рождественского в рубидии (а) и усиленная интерферограмма (б)

Успехи в применении методов цифровой голографии в интерферометрах для измерения малых размеров [1–3] позволили применить аналогичную технику и в спектроскопической интерферометрии. Метод повышения чувствительности (усиления) интерферограммы, основанный на ее восстановлении в виде голограммы и обеспечения записи вторичной картины интерференции двух пучков, продифрагировавших на первичной интерферограмме в различные порядки дифракции, был применен к т.н. крюкам Рождественского. Крюки Рождественского получают в одноименном интерферометре, представляющем собой сочетание интерферометра Маха — Цендера, Жамена или реже Майкельсона и дисперсионного (призменного или решеточного) спектрографа. Линии поглощения в таком интерферометре отображаются в виде характерных «крюков» (рис. 1а), по изгибу которых можно судить о силе соответствующего атомных осцилляторов. Голографическое усиление (рис. 1б) «разгибает» крюки и существенно упрощает их интерпретацию.

Источники

[1] Зейликович И.С. Голографические методы регулировки чувствительности интерференционных измерений при диагностике прозрачных сред / И.С. Зейликович, А.М. Ляликов // УФН. — 1991. — 161 (1). — С. 143–164.

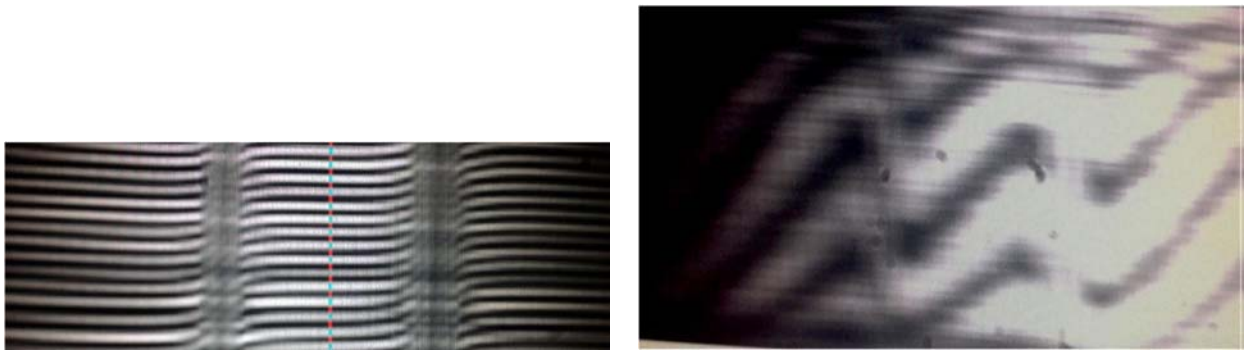
[2] Sevrygin A.A. Digital holographic Michelson interferometer for nanometrology / A.A. Sevrygin, V.I. Korotkov, S.A. Pulkin, I.M. Tursunov, D.V. Venediktov, V.Yu. Venediktov, O.V. Volkov // Holography, Diffractive Optics, and Applications VI. SPIE Proc. — 2014. — Vol. 9271. — P. 927118

[3] Sevryugin A.A. Digital holographic interferometer with correction of distortions / A.A. Sevryugin, S.A. Pulkin, I.M. Tursunov, D.V. Venediktov, V.Y. Venediktov // Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XII and Quantum Information Science and Technology. SPIE Proc. — 2015. — Vol. 9648. — P. 96480E.

Application of digital holography in holographic interferometer

V.Yu. Venediktov[1, 2], D.V. Venediktov[2], S.A. Pul'kin[2], A.A. Sevryugin[1], I.M. Tursunov[1]
[1] Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia
[2] Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

The progress in the field of digital holography and the advanced elements like various matrix photosensors, matrix phase modulators etc. have returned to the zone of interest the well known methods of holographic interferometery, and, in particular, various methods of controlling the parameters of interference pattern [1]. Earlier we have shown that the earlier unavailable, but simple today combination of digital and analogous techniques makes it possible to fulfill the magnification of holograms (increase of their sensitivity) [2], the correction of distortions, imposed by the elements of interferometer [3] etc. The paper presents the review of corresponding results.



a) b)

Fig. 1. Rozhdestvenskiy "hooks" in rubidium (a) and the amplified interferogram (b)

The said progress in application of digital holography in interferometers for measuring small size objects [1–3] made it possible to apply the similar technique in spectroscopic interferometery. The method of amplification of hologram (its sensitivity increase), which is used on interference of different diffraction orders from the primary (raw) interferogram was applied to the so-called Rozhdestvenskiy hooks. Such hooks are obtained in the Rozhdestvenskiy interferometer (Mach-Zehnder, Jamin or more rarely Michelson interferometer, combined with the prism or grating spectrograph). In such a device the absorption lines reveal themselves as specific "hooks" (see upper figure), whose curvature provides the information about the atomic oscillator force. The holographic amplification "smoothes" the hooks and thus makes their analysis much simpler.

References

[1] Zeĭlikovich I.S. Holographic methods for regulating the sensitivity of interference measurements for transparent media diagnostics / I.S. Zeĭlikovich, A.M. Lyalikov // Sov. Phys. Usp. — 1991. — Vol. 34. — No. 1. — P. 74–85.
[2] Sevrygin A.A. Digital holographic Michelson interferometer for nanometrology / A.A. Sevrygin, V.I. Korotkov, S.A. Pulkin, I.M. Tursunov, D.V. Venediktov, V.Yu. Venediktov, O.V. Volkov // Holography, Diffractive Optics, and Applications VI. SPIE Proc. — 2014. — Vol. 9271. — P. 927118.

[3] Sevryugin A.A. Digital holographic interferometer with correction of distortions / A.A. Sevryugin, S.A. Pulkin, I.M. Tursunov, D.V. Venediktov, V.Y. Venediktov // Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XII and Quantum Information Science and Technology. SPIE Proc. — 2015. — Vol. 9648. — P. 96480E.

П.10 Методы увеличения разрешающей способности и глубины резкости синтезированных голограмм-проекторов

С.Н. Корешев, О.В. Никаноров, М.А. Фролова, Я.А. Новицкая
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Синтез голограмм, как известно, базируется на широком использовании информационных технологий и не предполагает наличия реально существующего объекта. Вместо него используется его математическая модель. Замена реально существующих предметов на их математические модели предоставляет широкие возможности для целенаправленного манипулирования формой их представления, позволяя тем самым существенно изменять изображающие свойства синтезированных голограмм. Так, например, в [1] описано влияние формы представления объекта на структуру линий в восстановленном изображении транспаранта. Настоящая работа посвящена разработке методов увеличения разрешающей способности и глубины резкости синтезированных голограмм-проекторов, основанных на манипулировании формой представления объектов.

В основу предложенного метода увеличения разрешающей способности синтезированных голограмм-проекторов положен широко известный в фотолитографии метод фазовой коррекции эффектов близости. Его суть заключена в устранении негативного влияния вторичных дифракционных максимумов сформированного изображения фотошаблона на разрешающую способность фотолитографического процесса за счет использования в простанстве предметов фазовых масок, обеспечивающих противофазность излучения, формирующего изображения соседних элементов структуры фотошаблона [2]. В результате интерференции волн, формирующих изображения соседних элементов структуры изображения фотошаблона, в противофазе происходит взаимное ослабление вторичных максимумом в области между изображениями двух соседних элементов фотошаблона, что делает их хорошо различимыми и повышает разрешающую способность. Практическая реализация этого метода при синтезе голограмм-проекторов не требует использования реально существующих фазовых масок, а сводится лишь к изменению формы математического описания объекта, т.е. к введению соответствующей фазовой модуляции в функцию пропускания объекта.

Экспериментальное исследование влияния описанного выше метода фазовой коррекции эффекта близости на изображающие свойства синтезированных голограмм-проекторов проводилось применительно к полутоновым голограммам-проекторам Френеля и осуществлялось с помощью специализированного программного комплекса синтеза и восстановления голограмм [3]. При этом все эксперименты, если это не оговорено особо, выполнялись при следующих физических и геометрических параметрах синтеза и восстановления голограмм. Рабочая длина волны голограмм-проекторов — 13,5 нм, размер голограмм — проекторов 435×435 пикселов размером 20×20 нм^2, Размер пикселов в плоскостях объекта и изображения был выбран равным 20×20 нм^2 исходя из результатов работы [1]. Угол падения параллельного опорного пучка был равен 14,7^0, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы составляло — 20,4 мкм. Объект представлял собой установленный в параллельном пучке лучей непрозрачный транспарант, содержащий две параллельные друг другу прозрачные щели размером 4×40 пикселов, т.е. 80×800 нм^2. Методика исследования включала в себя синтез голограмм-проекторов Френеля вышеописанного объекта при расстояниях между щелями, изменяющимися в пределах от 600 нм до 40 нм с шагом 20 нм, т.е. от 30 пикселов до 2 пикселов с шагом 1 пиксел. Для каждого

расстояния между щелями синтезировались две голограммы, одна из которых соответствовала случаю синфазности излучения, прошедшего через транспарант, в плоскости самого транспаранта, а вторая – случаю противофазности излучения, прошедшего через щели транспаранта. Полученные таким образом голограммы подвергались цифровому восстановлению с помощью того же самого комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля, что позволяло оценить разрешение и уровень помех, достигнутые при различных условиях эксперимента. Результаты этого исследования представлены на рис. 1.

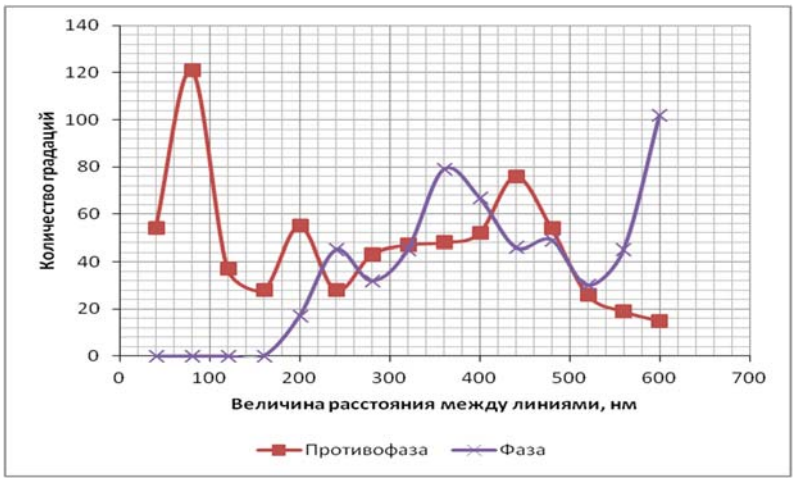


Рис. 1. Графики зависимости числа допустимых уровней пороговой обработки от выбранного при синтезе голограммы-проектора расстояния между щелями и того в фазе или в противофазе находилось в плоскости объекта излучение, прошедшее через щели

Из представленных графиков следует, что применение метода фазовой коррекции эфекта близости при синтезе голограмм-проекторов позволяет существенно, более чем в два раза, повысить разрешающую способность голографического варианта проекционной фотолитографии и довести ее при указанных выше параметрах синтеза и восстановления голограмм-проекторов до 40 нм. Отметим, что характеристический, т.е. минимальный размер элемента структуры восстановленного изображения в рассматриваемом случае составлял 80 нм. Таким образом, результаты проведенного исследования свидетельствуют о возможности двухкратного уменьшения норм проектирования в голографическом фотолитографическом процессе при использовании фазовой коррекции эффекта близости, позитивного фоторезиста и фотошаблонов, в которых элементы структуры изготавливаемого изделия отображаются в виде промежутков между двумя прозрачными областями.

Глубина резкости проекционной системы является одной из важнейших характеристик фотолитографического оборудования. Традиционный путь уменьшения норм проектирования изготавливаемых изделий, основанный на уменьшении рабочей длины волны используемого излучения и увеличении апертур проекционных оптических систем, приводит к существенному уменьшению глубины резкости изображения, формируемого на поверхности покрытой слоем фоторезиста полупроводниковой пластины. Точно также обстоят дела с глубиной резкости физически зарегистрированных и синтезированных традиционным способом, т.е. путем математического моделирования физически регистрируемого голографического поля, голограмм-проекторов. Вместе с тем, синтез голограмм-проекторов, осуществляемый, как известно, в вертуальном пространстве, позволяет производить некие, не осуществимые в реальном физическом пространстве, манипуляции с формой представления объекта, которые способны воздействавать на глубину резко отображаемого пространства. Например, если синтезировать голограмму-проектор таким образом, чтобы она при восстановлении вместо

одного изображения фотошаблона формировала бы несколько его изображений, располагаемых одно за другим на расстояниях друг от друга, не превышащих традиционную глубину резкости, то, казалось бы, можно было бы достичь существенного увеличения глубины резкости восстанавливаемого изображения.

Практическая реализация синтеза подобной голограммы-проектора требует использования такой формы описания объекта, при которой объектная волна представляется в виде суперпозиции нескольких объектных волн, формируемых одним и тем же фотошаблоном, при различных расстояниях от плоскости синтеза голограммы, отличающихся друг от друга на величину, не превышающую традиционную глубину резкости голограммы.

Экспериментальная оценка влияния описанной выше формы представления объекта на глубину резкости восстановленного изображения включала в себя синтез голограмм-проекторов объекта, имеющего вид светлого перекрестия на темном фоне. При их синтезе объектная волна представлялась в виде суперпозиции двух волн, порожденных объектами, расположенными на различных расстояниях от плоскости синтеза голограммы. При этом расстояния между объектами изменялись от голограммы к голограмме с шагом 100 нм и лежали в пределах от 100 до 400 нм. Размер голограмм-проекторов был выбран равным 435×435 пикселей размером 20 нм^2, угол падения опорного пучка составлял 14,7°, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы было равно 20 345 нм. Ширина линий объекта была равна 80 нм при размере пикселей в плоскости объекта 80×80 нм^2. Рабочая длина волны голограмм-проекторов — 13,5 нм. Отметим, что расчетная глубина резкости при выбранных параметрах синтеза и восстановления голограмм-проекторов составляла 474 нм. В результате выполненного исследования было установлено, что наибольшая глубина резкости восстановленного изображения реализуется в случае представления объектной волны в виде суперпозиции волн, порожденных объектами, располагаемыми на расстоянии друг от друга, близком к традиционной глубине резкости, т.е. на расстоянии приблизительно равном протяженности центрального максимума в ограниченном дифракцией изображении точечного объекта. Полученные результаты иллюстрирует рис. 2, на котором приведены графики, демонстрирующие зависимость глубины резкости восстановленного изображения от расстояния между объектами, принятого при расчете комплексной амплитуды объектной волны. На нем точки соответствуют традиционному случаю одного объекта, треугольники — двум объектам, расположенным на расстоянии 100 нм друг от друга, крестики — двум объектам, расположенным на расстоянии 200 нм. Отметим, что традиционный случай одного объекта соответствовал расстоянию между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы, равному 20,4 мкм. По оси ординат на рис. 2 отложено имитирующее влияние фоторезиста на восстановленное изображение допустимое число уровней пороговой обработки изображения, при котором его структура полностью соответствует структуре исходного объекта, нормированное по максимальному числу уровней, достигаемому при данных параметрах синтеза и восстановления голограммы. [3]. Представленные графики свидетельствуют о достижении примерно полуторного увеличения глубины резкости изображения, восстанавливаемого с помощью синтезированной голограммы-проектора.

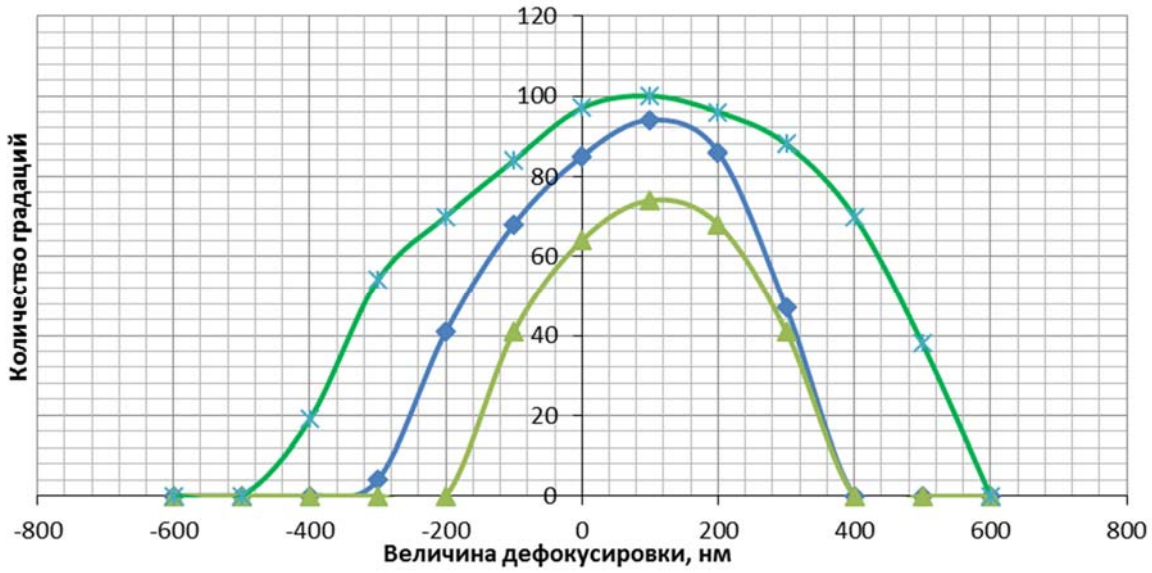


Рис. 2. Графики зависимости глубины резкости восстановленного изображения от расстояния между объектами, принятого при расчете комплексной амплитуды объектной волны в процессе синтеза голограммы

Еще больший эффект с точки зрения увеличения глубины резкости дает фазовое согласование парциальных, т.е. составляющих объектную волну при синтезе голограмм-проекторов, волн. Так введение между ними фазового сдвига, равного 0,3π, при таком же, равном 200 нм, расстоянии между положениями объекта при синтезе голограммы, обусловило достижение еще большей, равной ±900 нм глубине резкости восстановленного изображения. Таким образом, сочетание метода фазовой коррекции эффекта близости и формы описания объектной волны, при которой она представляется в виде суперпозиции двух волн, порожденных одним и тем же объектом, позволяет увеличить глубину резкости восстановленного изображения более, чем в 2,5 раза и, тем самым, перевести из нанометров в микрометры требования, предъявляемые к точности установки полупроводниковой пластины в литографе, работающем в 10–15 нм диапазоне длин волн. Отметим, что такое же увеличение глубины резкости восстановленного изображения может быть достигнуто и без использования фазового сдвига, а лишь за счет представления объектной волны в виде суперпозиции не двух, а трех волн, порожденных одним и тем же объектом, располагаемом на трех, отличающихся друг от друга на 200 нм расстояниях от плоскости голограммы.

Источники

[1] 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.
[2] Моро У. Микролитография // М.: Мир. 1990. — 1240 с.
[3] Корешев С.Н. Метод синтеза голограмм-проекторов, основанный на разбиении структуры объекта на типовые элементы и программный комплекс для его реализации / С.Н. Корешев, О.В. Никаноров, А.Д. Громов // Оптический журнал. — 2012. — Том 79. — №12. — С. 30–37.

Methods for increasing the resolution and depth of field in computer generated hologram-projectors

S.N. Koreshev, O.V. Nikanorov, M.A. Frolova, Ya.A. Novitskaya
Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

The problem of resolution and depth of field increasing in Fresnel synthesized holograms-projectors are discussed. The work is done in the case of the flat two-dimensional object, for example, photo mask or the working area of optical tweezers. The efficiency of well known in traditional projection photolithography method such as the phase correction of the proximity effect is demonstrated in order to enhance the resolution ability of the Fresnel synthesized holograms-projectors. A method of depth of field extension in images reconstructed by the Fresnel synthesized holograms-projectors is proposed. It based on representing the complex amplitude of the object wave at the hologram synthesis as the superposition of the complex amplitudes of the several object waves generated by the same object at different distances from the hologram, characterized by the value not exceeding the depth of field in image of a single object.

П.11 Особенности использования PSM-метода при расчете дифракционной эффективности толстых отражательных голограмм

Г.И. Грейсух[1], Е.Г. Ежов[1], С.В. Казин[1], С.А. Степанов[1], К.Н. Афанасьев[2], А.С. Бородулин[2]
[1] Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия
[2] Московский филиал ЛГ Электроникс Инк., Москва, Россия

Одним из наиболее распространенных методов расчета дифракционной эффективности (ДЭ) толстых (объемных) голограмм уже на протяжении нескольких десятилетий является метод связанных волн Когельника [1]. Главным достоинством метода Когельника является то, что это аналитический метод, поэтому он позволяет достаточно легко и наглядно проанализировать влияние на ДЭ различных параметров записи и восстановления голограммы. Однако, как практически всякий аналитический метод, метод Когельника имеет и ряд ограничений, одним из которых является то, что в его рамках голограмма рассматривается как синусоидальная решетка, что не позволяет этот метод непосредственно распространить на мультиплицированные объемные голограммы.

Недавно, для расчета ДЭ объемных голограмм, был предложен PSM-метод (аббревиатура «parallel stacked mirrors»), в соответствии с которым исследуемая объемная голограммная решетка представляется как набор параллельных частично отражающих слоев [2]. Этот метод, как и метод Когельника, является аналитическим методом, однако, в отличие от метода Когельника он позволяет, в частности, исследовать объемные фазовые голограммы, у которых распределение показателя преломления по их глубине, представляет не только синусоидальную, но и практически любую периодическую функцию. Это открывает возможность исследования в рамках PSM-метода как спектральных, так и пространственных мультиплексных объемных голограмм [3].

В настоящей работе демонстрируется эффективность использования PSM-метода для оценки требований, предъявляемых к характеристикам фоточувствительного слоя в случае записи многоцветных (т.е. спектрально мультиплицированных) фазовых объемных голограмм. Кроме того, в работе показано, как можно использовать PSM-метод при расчете ДЭ объемной голограммы в случае ее нелинейной регистрации.

В рамках данной работы PSM-метод используется при оценке требований, предъявляемых к характеристикам фоточувствительного слоя в случае записи многоцветных, т.е. спектральных мультиплексных фазовых объемных голограмм. Кроме того, в работе показано, как можно использовать PSM-метод при расчете ДЭ объемной голограммы в случае ее нелинейной регистрации.

На рис. 1 представлена объемная фазовая отражательная голограммная решетка и показаны основные обозначения, используемые в рамках PSM-метода. В соответствии с этим рисунком голограмма находится в среде с показателем преломления n_0 — средним значением показателя преломления самой голограммы, а плоскости равного показателя преломления (страты) не параллельны плоскости голограммы. Первое из этих условий позволяет при расчете ДЭ не учитывать френелевы потери на границе среда-голограмма.

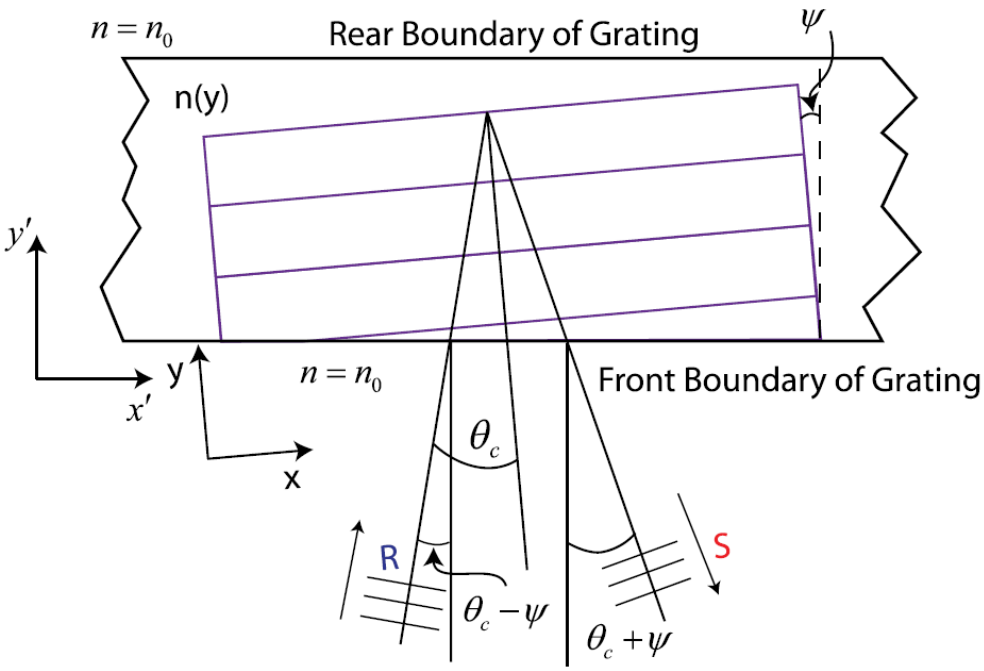


Рис. 1. Объемная фазовая отражательная голограммная решетка в случае, когда плоскости равного показателя преломления не параллельны плоскости голограммы

В соответствии с рис. 1 вводятся следующие обозначения: ψ — угол между нормалью к стратам и нормалью к плоскости голограммы; θ_c — угол между падающим на голограмму (восстанавливающим) лучом R и нормалью к стратам; $\theta_c - \psi$ — угол между падающим на голограмму лучом R и нормалью к плоскости голограммы; $\theta_c + \psi$ — угол между отраженным от страты (восстановленным) лучом S и нормалью к плоскости голограммы. Кроме того, далее будем использовать следующие обозначения: d — толщина голограммы; λ_c и $\lambda_г$ — длины волн восстановления и записи голограммы в свободном пространстве (в воздухе); $\theta_г$ — углы между записывающими лучами и нормалью к стратам; n_1 — амплитуда переменной составляющей показателя преломления голограммы.

При оценке ДЭ спектральных мультиплексных голограмм будем считать, такая голограмма содержит пространственно одинаково ориентированные решетки (угол ψ для всех решеток одинаков). Кроме того, положим, что для всех решеток и углы между записывающими лучами и нормалью к стратам $\theta_г$ также одинаковы. В этом случае период каждой решетки вдоль оси y, определяемый уравнением

$$\Lambda = \frac{\lambda_г}{2n_0 \cos \theta_г},$$

отличается у разных решеток только благодаря разной длиной волны записи $\lambda_г$.

При оговоренных выше условиях в рамках PSM-модели для всех длин волн при одинаковом угле падения будет одинаков и угол отражения. Причем, при угле падения $\theta_c = \theta_г$ и на длине волны $\lambda_c = \lambda_{гi}$, максимальная ДЭ каждой решетки будет близка к единице в силу выполнения условия Брэгга.

Далее будем считать, три длины волны записи выбраны так, что при наложении монохроматических пучков, соответствующих этим длинам волн, образуется белый свет. Очевидно, что в этом случае выбранные длины волн записи отдельных решеток будут существенно отличаться друг от друга, и если у первой решетки максимальная ДЭ на длине волны $\lambda_c = \lambda_{г1}$ близка к единице, то у двух других решеток на этой длине волны ДЭ будет

практически равна нулю. В этом случае влияние спектральной мультиплексности на ДЭ обусловлено лишь тем, что для каждой решетки ее амплитуда переменной составляющей показателя преломления n_1 будет меньше величины допустимой суммарной амплитуды модуляции показателя преломления δn фоточувствительного слоя голограммы.

В случае «трехцветной» голограммы, у которой каждая из решеток имеет одинаковую амплитуду переменной составляющей показателя преломления, эта амплитуда будет равна $n_{1i} = \delta n/3$. При сравнительно небольшой толщине фоточувствительного слоя голограммы это может привести к снижению максимального значения ДЭ голограммы на каждой из длин волн. Причем, чем больше длина волны, тем это снижение будет большим.

Сказанное иллюстрируется рис. 2 и 3, на которых приведены спектральные распределения ДЭ σ-поляризованного излучения «одноцветной» и «трехцветной» объемной фазовой голограммы, имеющей в обоих случая одинаковую толщину ($d = 7$ мкм). Сразу же напомним, что σ-поляризация соответствует электромагнитной волне, у которой вектор $\boldsymbol{E}$ перпендикулярен плоскости падения луча. Очевидно, что для того, чтобы ДЭ «трехцветной» голограммы имела бы на всех длинах волн записи значения близкие к единице толщину ее фоточувствительного слоя необходимо существенно увеличить, что и иллюстрирует рис. 4, который получении при толщине $d = 30$ мкм.

Рассмотрим теперь влияние на ДЭ нелинейного режима записи объемной «одноцветной» голограммы, обусловленного её переэкспонированием. В этом случае при переходе от линейного к нелинейному режиму, а затем — и к режиму насыщения, среднее значение показателя преломления фоточувствительного слоя возрастает, а верхние части синусоиды, модулирующей показатель преломления, достигнув максимального для данного фоточувствительного слоя значения показателя преломления, в первом приближении превращаются в горизонтальные участки (плато) с относительной шириной $\varepsilon = \tau/\Lambda$, где $0 \le \varepsilon \le 0{,}5$ (рис. 5). В результате распределение показателя преломления останется периодическим, но в пределах одного периода оно будет описываться уже не непрерывной, а кусочно-гладкой функцией.

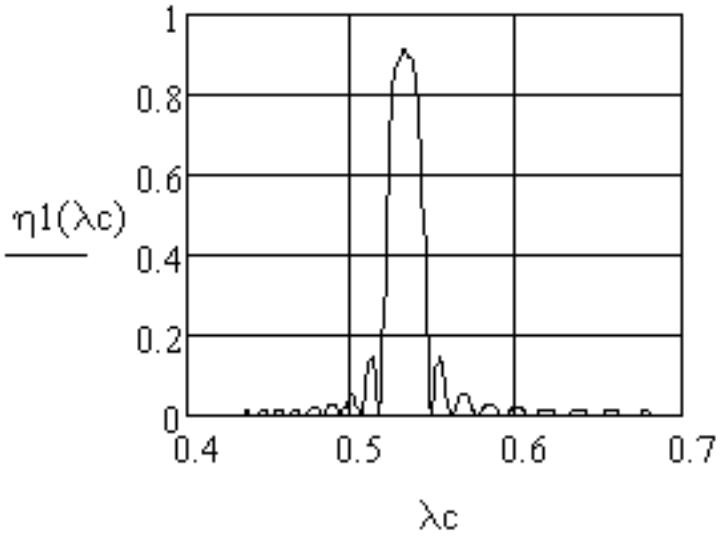


Рис. 2. Спектральное распределение ДЭ σ-поляризованного излучения «одноцветной» объемной фазовой голограммы

Параметры записи и восстановления голограммы:

$d = 7$ мкм; $n_0 = 1{,}5$; $\theta_г = 0°$; $\psi = 0°$; $\theta_с = 0°$, $\lambda_г = 0{,}532$ мкм; $n_1 = 0{,}45$.

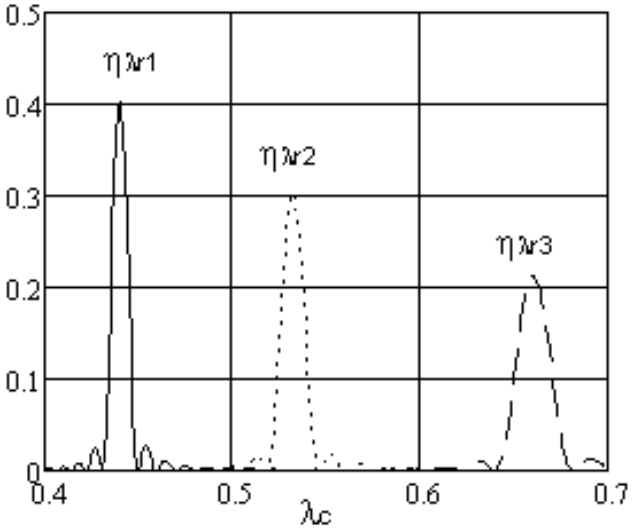


Рис. 3. Спектральное распределение ДЭ σ-поляризованного излучения «трехцветной» объемной фазовой голограммы

Параметры записи и восстановления голограммы:

$d = 7$ мкм; $n_0 = 1{,}5$; $\theta_г = 0°$; $\psi = 0°$; $\theta_с = 0°$; $\lambda_{r1} = 0{,}440$ мкм; $\lambda_{r2} = 0{,}532$ мкм и $\lambda_г = 0{,}660$ мкм; $n_{1i} = \delta n/3 = 0{,}045/3$.

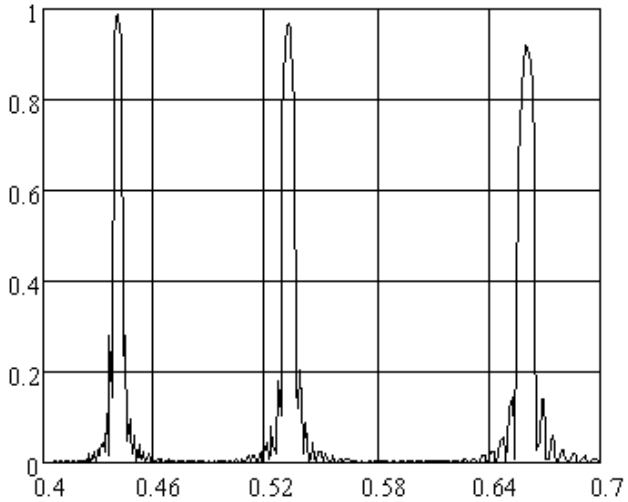


Рис. 4. Спектральное распределение ДЭ σ-поляризованного излучения «трехцветной» объемной фазовой голограммы

Параметры записи и восстановления голограммы:

$d = 30$ мкм; $n_0 = 1{,}5$; $\theta_г = 0°$; $\psi = 0°$; $\theta_с = 0°$; $\lambda_{r1} = 0{,}440$ мкм; $\lambda_{r2} = 0{,}532$ мкм и $\lambda_г = 0{,}660$ мкм; $n_{1i} = \delta n/3 = 0{,}045/3$.

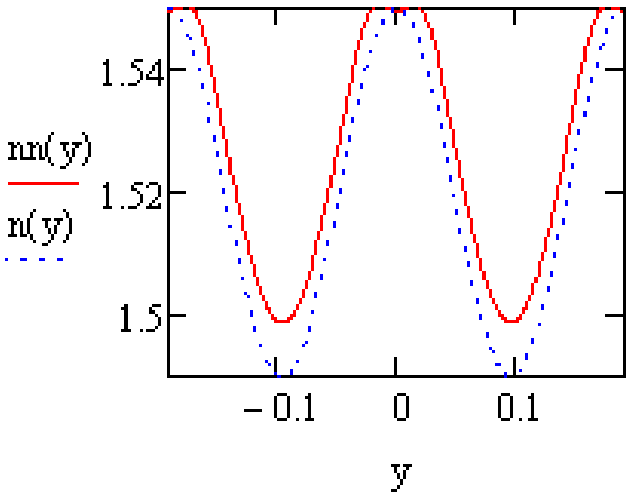


Рис. 5. Распределение показателя преломления фоточувствительного слоя голограммы при линейном (пунктирная кривая) и нелинейном (сплошная кривая) режиме ее записи

Тот факт, что распределение показателя преломления, трансформируясь, остается периодическим, позволяет использовать для анализа влияния нелинейности записи голограммы на ДЭ подход аналогичный тому, который использовался при анализе спектральных мультиплексных голограмм.

Действительно, как и любую периодическую функцию, закон изменения показателя преломления можно разложить в ряд Фурье и считать, что микроструктура голограммы включает набор одинаково ориентированных решеток с одинаковыми углами $\theta_г$, причем записанных как на реальной длине волны $\lambda_г$, так и на виртуальных длинах волн, кратно отличающихся от реальной длины волны записи: $2\lambda_г$, $3\lambda_г$, ...

На рис. 6 и 7 представлены кривые, характеризующие влияние на ДЭ «одноцветной» голограммы нелинейного режима ее записи при различных относительных ширинах плато $\varepsilon = \tau/\Lambda$ в распределении показателя преломления фоточувствительного слоя. Из приведенных рисунков видно, что негативное влияние нелинейного режима записи голограммы на величину максимального значения ДЭ начинает сказываться при относительных ширинах плато $\varepsilon > 0{,}25$.

Таким образом, PSM-метод, несомненно, расширяет как возможности расчета ДЭ объемных голограмм, так и оценки влияния на эффективность различных параметров записи и восстановления включая, в частности, оценку влияния на ДЭ процесса нелинейности записи, что, как правило, всегда имеет место в реальных физических экспериментах.

В заключение отметим, что методом Когельника и строгой теорией связанных волн [4] ДЭ рассчитывается в направлении, даваемом уравнением дифракции на объемной отражательной решетке [5]. В то же время PSM-методом ДЭ рассчитывается в направлении, определяемом законом отражения от страт (рис. 1). В результате, если страты параллельны плоскости голограммы ($\psi = 0$), все перечисленные методы определяют ДЭ в одном и том же направлении независимо от направления падения на голограмму восстанавливающего излучения. Если же $\psi \neq 0$, то перечисленные методы определяют ДЭ в одинаковых направлениях, лишь при выполнении условия Брэгга [6].

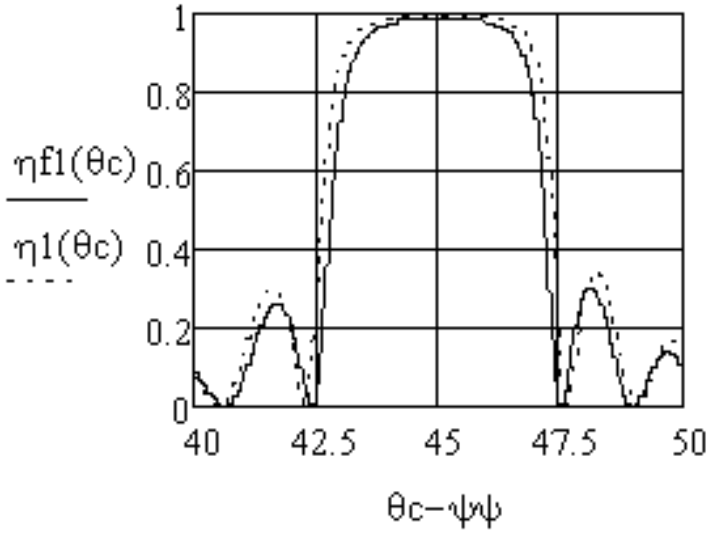


Рис. 6. Угловое распределение ДЭ σ-поляризованного излучения при линейном (пунктирная кривая) и нелинейном (сплошная кривая) режиме записи объемной голограммы

Параметры записи и восстановления голограммы:

$d = 15$ мкм; $n_{min} = 1{,}49$; $n_{max} = 1{,}55$; $\lambda_r = 0{,}532$ мкм; $\theta_r = 22{,}5°$; $\psi = -22{,}5°$; $\lambda_c = 0{,}532$ мкм; $\varepsilon = 0{,}25$.

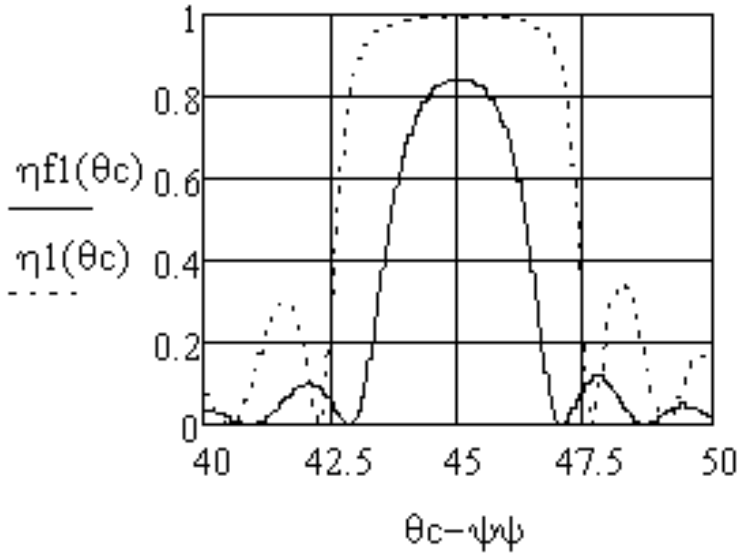


Рис. 7. Угловое распределение ДЭ σ-поляризованного излучения при линейном (пунктирная кривая) и нелинейном (сплошная кривая) режиме записи объемной голограммы

Параметры записи и восстановления голограммы:

$d = 15$ мкм; $n_{min} = 1{,}49$; $n_{max} = 1{,}55$; $\lambda_r = 0{,}532$ мкм; $\theta_r = 22{,}5°$; $\psi = -22{,}5°$; $\lambda_c = 0{,}532$ мкм; $\varepsilon = 0{,}5$.

Тем не менее, проведенные авторами оценки степени рассогласования в углах дифракции показали, что это рассогласование незначительно и лежит в пределах углового распределения ДЭ, даваемого PSM-методом. Это позволяет сделать вывод о том, что PSM-метод дает достоверные оценки зависимости ДЭ от длины волны и угла падения восстанавливающего излучения.

Источники

[1] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram grating // Bell. Syst. Tech. J. — 1969. — Vol. 48. — P. 2909–2947.
[2] Brotherton-Ratcliffe D. A treatment of the general volume holographic grating as an array of parallel stacked mirrors // J. Mod. Opt. Vol. — 2012. — Vol. 59. — P. 1113–1132.
[3] Brotherton-Ratcliffe D. Analytical treatment of the polychromatic spatially multiplexed volume holographic grating // Appl. Opt. — 2012. — Vol. 51 (30). — P. 7188–7199.
[4] Moharam M.G. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction / M.G. Moharam, T.K. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. — 1981. — Vol. 71 (7). — P. 811–818.
[5] Welford W.T. Aberrations of Optical Systems / Adam Hilger. — 1986. — P. 77.
[6] Кольер Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. — М.: Мир, 1973. — 686 с.

Features of using the PSM method for calculation of the diffraction efficiency of thick reflective hologram

G.I. Greisukh[1], E.G. Ezhov[1], S.V. Kazin[1], S.A. Stepanov[1], K.N. Afanasyev[2], A.S. Borodulin[2]
[1] Penza state university of architecture and construction, Penza, Russia
[2] Russian branch of LG electronics Inc., Moscow, Russia

Recently, for the calculation of the diffraction efficiency (DE) of volume holograms was proposed by the parallel stacked mirrors (PSM) method. Volume holographic grating in accordance with this method is presented in the form of a set of parallel partially reflecting layers [1]. This method, like the method of Kogelnik [2], is the analytical method. However, unlike the Kogelnik-method PSM-method permits, in particular, to investigate the volume phase holograms, whose distribution of refractive index along their depths, is not only sinusoidal but also almost any periodic function. This advantage allows us to study within the framework of PSM-method both spectrally and spatially multiplexed volume holograms.

In this paper, PSM-method is used to assess the performance requirements for the photosensitive layer in the case of multi-color recording, i.e. spectrally multiplexed phase volume holograms. Furthermore, we have shown how to use the PSM-method to calculate the DE of volume phase hologram in the case of non-linear recording.

The paper draws attention to another difference between the PSM-method, Kogelnik-method and rigorous coupled-wave theory. It refers to the direction in which it is determined DE. With help of two last methods, the DE is calculated in the direction determined by the equation of diffraction at volume reflection grating. While PSM-method performs calculation of DE in a direction determined by the law of reflection from striations, (i.e. the planes have equal refractive indices).

As a result, if the planes of striations and hologram are parallel, then all methods determine DE in the same direction. Moreover, this direction is independent of the reconstructing radiation incidence angle. If the hologram plane and striations are not mutually parallel, these methods determine the DE in the same direction only when the Bragg condition is performed. Estimates mismatches diffraction angles are presented. They show that these mismatches is negligible and they within the angular distribution of the DE which given by PSM-method.

References

[1] Brotherton-Ratcliffe D. A treatment of the general volume holographic grating as an array of parallel stacked mirrors // J. Mod. Opt. Vol. — 2012. — Vol. 59. — P. 1113–1132.

[2] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram grating // Bell. Syst. Tech. J. — 1969. — Vol. 48. — P. 2909–2947.
[3] Brotherton-Ratcliffe D. Analytical treatment of the polychromatic spatially multiplexed volume holographic grating // Appl. Opt. — 2012. — Vol. 51 (30). — P. 7188–7199.

П.12 Новые фото-термо-рефрактивные стекла для записи объемных голограмм: свойства, технологии и применения

Н.В. Никоноров
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

New photo-thermo-refractive glasses for volume holograms recording: properties, technologies and applications

N.V. Nikonorov
Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

The current stage of development of optical, photonic and plasmonic devices calls for new and most likely miniature optical elements that cannot be fully implemented on the basis of traditional materials and technologies. Therefore, the great attention is being paid worldwide to the development of novel optical materials.

The novel fluorine, chlorine and bromine photo-thermo-refractive (PTR) glasses developed in ITMO University (St. Petersburg, Russia) are very promising optical materials for optical, photonic and plasmonic applications [1]. PTR glass is a multicomponent photosensitive silicate glass doped with halogens (fluorine, chlorine or bromine) and also antimony, cerium, and silver [2]. The PTR glass changes its refractive index after an exposure to the near UV radiation followed by thermal treatment at temperatures close to the glass transition one (Tg). For example, in case of fluorine PTR glass, that results in the precipitation of nano-crystalline phases of NaF in glass host and negative increment of RI ($\Delta n = -1000$ ppm). In other words, it results in decrease of RI in irradiated area in comparison with unirradiated area of glass. In case of chlorine and bromine PTR glasses that results in growth of AgCl and AgBr nanocrystals and positive increment of RI ($\Delta n = +1500$ ppm).

The sizes of NaF, AgCl and AgBr nanocrystals are relatively small (10–20 nm), that is why PTR glasses exhibit rather a low level of scattering. The fluorine PTR glass is successfully used for the fabrication of holographic optical elements (HOEs) that dramatically enhance properties of numerous laser systems and spectrometers. It shows high photosensitivity, high thermal stability of the recorded phase holograms, and high tolerance to optical and ionizing irradiation. Basic optical and spectral properties of fluorine PTR glass are described in [3]. The HOEs recorded in the fluorine PTR glass reveal high chemical stability, thermal, mechanical and optical strength, and from this point of view practically reveal no difference with the commercial optical glass BK7 (Schott). The optical and spectral parameters of the HOEs and GRIN-elements do not change after its multiple heating to the high temperature (500 ºC). The important advantages of the fluorine PTR glass as the optical medium are following: (i) high optical uniformity (the refraction index fluctuations across the glass volume have the scale of some 10^5), (ii) reproducibility of its parameters during the starting glass synthesis and during the photo-thermo-induced crystallization, (iii) similarity to optical glass BK7, the PTR glass can be subjected to various methods of mechanical processing like grinding and polishing as well as various formation technologies like molding, aspheric surface production, and drawing fiber, (iv) one can fabricate the PTR glass both in laboratory (some hundreds grams) and in industrial (some hundreds

kilograms) conditions with the use of simple and non-toxic technology. The chemical reagents, which are necessary for glass fabrication, are commercially available and not too expensive. One has also to note some features of the fluorine PTR glass, which are unusual for recording media. For example, such media can be subjected to the ion-exchange technology, that providing the possibility to fabricate the ion-exchanged optical or plasmonic waveguides and the surface strengthening to improve the mechanical strength, chemical stability, thermal and optical strength of the PTR glass. Moreover, the photoetchable technology can be used in PTR glass to provide the possibility to fabricate "lab-on-a-chip" systems and optical microfluidic devices. PTR glass doped with rare earth ions reveals good laser characteristics [4] Recording the Bragg gratings in laser PTR glass opens up a possibility to develop lasers with distributed feedback.

Some characteristics of fluorine PTR-glass and VBGs are demonstrated in table 1.

Table 1. Characteristics of fluorine PTR-glass and VBGs.

Parameter	**Value**
Transparency range, nm	350–3000
Photosensitivity spectral range, nm	280–350
Photosensitivity, mJ/cm^2	50
RI change, Δn	1×10^{-3}
RI modulation amplitude, δn	5×10^{-4}
Induced optical loss, cm^{-1} - visible range - near IR range	 0,1 0,001
Space frequency, mm^{-1}	up to 5000
Diffraction efficiency, %	95
Hologram thickness, mm	0,1–10
Angular selectivity, ang. min	<1
Bandwidth FWHM, nm	0.1
Size, mm	up to 25×25
VBGs are completely stable at temperature, °C	300

Some examples of holographic optical elements have demonstrated below.

(a) Volume Bragg gratings for laser diodes:

Wide spread of laser diodes is connected with its high energy conversion efficiency, small size, simplicity of use and low cost. However, as is well known, the laser diodes have wide emission spectra and absence of spectral stability caused by temperature shifts during operation. This problem can be solved by mean of VBG, due to high spectral selectivity of recorded holograms implementation of such grating inside external cavity of laser diode can significantly narrow the output spectra. On the picture below is shown emission of laser diode with and without grating. As one can see grating narrows emission spectra (1000 times) from 6 nm down to 6 pm. Furthermore, due to high transparency of HOE on PTR glass there's almost no losses in resulting output power. Moreover, gratings can provide tunability for such lasers. By simple rotation of the element one can change output wavelength in a wide range. As experiments shows such laser can be tuned in the whole range of diode gain spectral range, which is about 10 nm.

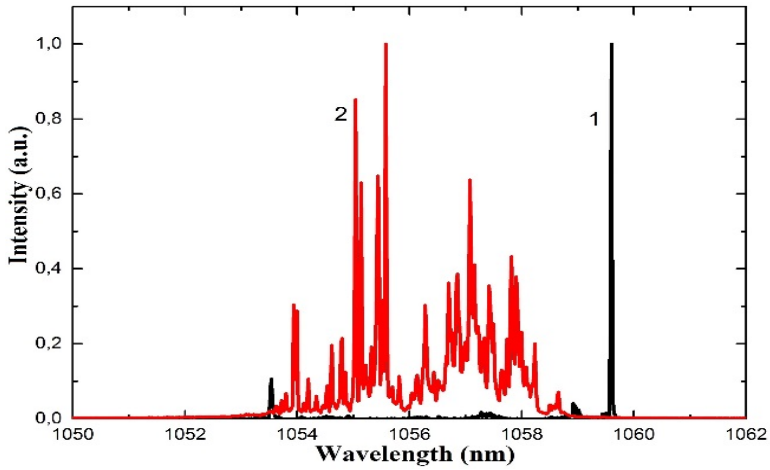


Fig. 1. Emission spectra of laser diode source with (1) and without (2) grating

(b) Imaging holograms for collimator sight:

High transparency of novel material in visible range (above 90%) opens a new field of applications with strict requirements to transmission in observation of channel such as collimator sight. Application of PTR glass can solve problem of mark image stabilization, which is necessary due to the instability of laser diode source used in such scopes. To date this problem is solved by addition in optical scheme achromatizing diffraction elements such as additional thin gratings, complex two-cavity mirrors or compound objectives. Wavelength shift, caused by laser diode temperature changes, can be nullified by spectral selectivity of thick hologram recorded on PTR glass. While the central wavelength of laser diode shifts, recorded hologram continues to reconstruct image of mark on proper angle — thus maintaining the position of mark in target plane. Moreover, redistribution of energy in diode output spectra leads to insignificant lowering of intensity of the mark that can be easily leveled by diode power output adjustment. Since the diffraction efficiency of holograms on PTR glass can achieve values of 99%, intensity required for mark observation is pretty low. Worth noting that up to date materials used for mark recording are vulnerable to external impact such as moisture and mechanical damage, that leads to need in additional cover for holograms. With application of PTR glass, since it is high resistant to external impacts, there is no need in additional protection of observation channel.

References

[1] Nikonorov N. New polyfunctional photo-thermo-refractive glasses for photonics applications / N. Nikonorov, V. Aseev, A. Ignatiev // In ODF'10. — 2010. — P. 209–210.

[2] Dubrovin V.D. Chloride photo-thermo-refractive glasses / V.D. Dubrovin, A.I. Ignatiev, N.V. Nikonorov // Optical Materials Express. — 2016. — Vol. 6. — №5. — P. 1701–1713.

[3] Efimov A.M. Quantitative UV-VIS spectroscopic studies of photo-thermo-refractive glasses. I. Intrinsic, bromine-related, and impurity-related UV absorption in photo-thermo-refractive glass matrices / A.M. Efimov, A.I. Ignatiev, N.V. Nikonorov, E.S. Postnikov // Journal of Non-Crystalline Solids. — 2011. — №357 (19-20). — P. 3500–3512.

[4] Aseev V.A. Spectroluminescence properties of photothermorefractive nanoglass-ceramics doped with ytterbium and erbium ions / V.A. Aseev, N.V. Nikonorov // Journal of Optical Technology. — 2008. — 75 (10). — P. 676.

П.13 Система интерференционной литографии с прямой лазерной записью на слое аморфного кремния

А.А. Кутанов[1], А.Г. Полещук[2], И.А. Снимщиков[1], Н. Сыдык уулу[1]
[1] Институт физико-технических проблем и материаловедения Национальной академии наук, Бишкек, Кыргызская Республика
[2] Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

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. Система использовалась для прямой лазерной записи микрорешеток на пленках аморфного кремния, нанесенные методом магнетронного распыления на поверхность стеклянных подложек. Продемонстрирована прямая лазерная запись точечных голограмм на пленке аморфного кремния импульсным УФ лазером с $\lambda = 355$ нм наносекундными импульсами 5–8 нс. Приведены результаты исследований по прямой лазерной записи на слое аморфного кремния интерференционного фильтра одномодовым полупроводниковым лазером с $\lambda = 405$ нм. Разработанные система и технология прямой записи микрорешеток могут быть использованы в дальнейшем для формирования просветляющих субволновых покрытий на поверхности солнечных панелей, изготовления мастер матриц для производства тисненных защитных голограмм, а также для записи микроструктур.

В последние годы лазерной интерференционной литографии уделяется большое внимание [1, 2]. 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, 4]. Один из простых массовых применений дифракционных структур — это антиотражающие покрытия на основе субволновых решеток [3] с периодом около половины длины волны света. Применение скоростных сканирующих систем интерференционной литографии (СИЛ) [1, 2], 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 результаты разработки оригинальной СИЛ для формирования простых микроструктур с произвольной ориентацией и периодом порядка 0,4–1,2 мкм, а также методов прямой лазерной записи по тонким пленкам аморфного кремния и получения интерференционных фильтров на их основе.

Система интерференционной литографии с прямой лазерной записью

В разработанной СИЛ применен известный «параллельно-последовательный» метод записи [2]. Интерференционная картина формируется в фокальной плоскости микрообъектива в ограниченной области пересечения двух сфокусированных пучков света.

На рис. 1 приведена блок-схема разработанной СИЛ [5] для записи ячеек дифракционных микроструктур. Каждая ячейка содержит линейную решетку с периодом *s* и углом ориентации θ, 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.

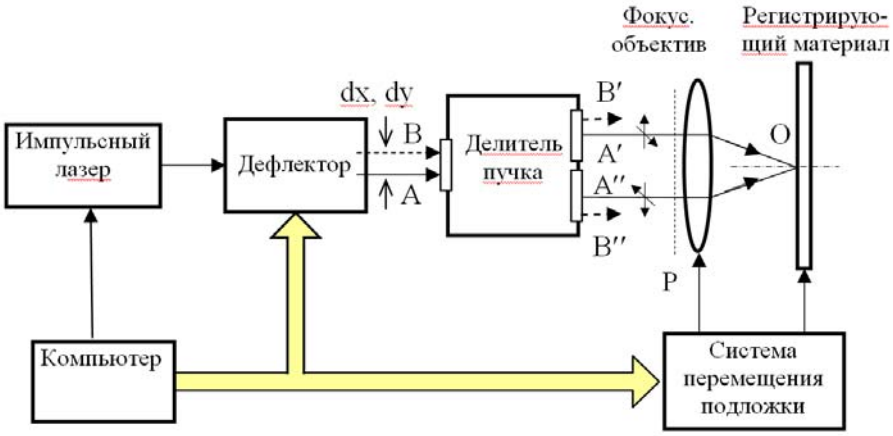


Рис. 1. Блок-схема СИЛ

Результаты лазерной записи на слое a-Si с использованием СИЛ

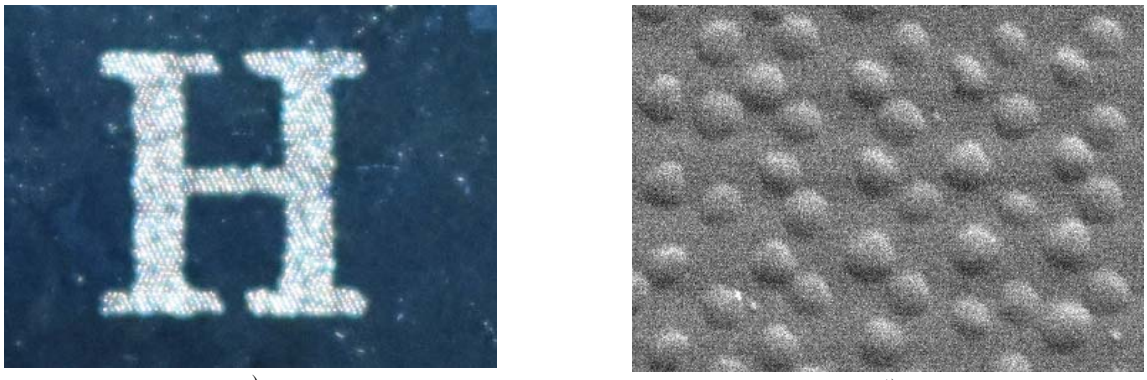
Для прямой лазерной записи использовались пленки аморфного кремния с различной толщиной, нанесенных методом магнетронного напыления на стеклянную подложку. Отработаны режимы записи точечных голограмм на пленки аморфного кремния с использованием импульсного Q-switch УФ-лазера с λ = 355 нм наносекундными импульсами (5–8 нс) и энергией импульса 0,10 мкДж.

На основе полученной записи микроструктур, сформулированы необходимые требования к импульсному лазеру: лазер должен быть одномодовым (TEM00) с идеальным качеством пучка; для получения высокого контраста интерференционной картины необходим лазер с хорошей длиной когерентности; энергия импульса должна быть достаточно высокой для фазового перехода a-Si по всему диаметру пучка; высокая частота повторения импульсов (1–30 кГц); высокая стабильность энергии от импульса к импульсу.

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

Нами предложены и получены интерференционные спектральные фильтры на пленках аморфного кремния с предварительно нанесенным на стеклянную подложку металлическим слоем,. Исследована прямая лазерная запись на пленки a-кремния лазерным экспонирующим излучением с длиной волны λ = 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 рис. 2а приведена фотография записанной с помощью одномодового Blu-Ray лазера на слое a-Si интерференционного фильтра латинской буквы H специально для конференции HoloExpo.

При воздействии сфокусированным лазерным излучением на слой a-Si происходит локальное изменение пропускания слоя и формирование рельефа, что хорошо видно на фотографии на рис. 2б.



а) б)

Рис. 2. Фотографии последовательной записи сфокусированным лазерным излучением с λ = 405 нм буквы Н на слое a-Si интерференционного фильтра (а) и рельефной структуры записи (б) на a-Si, снятой на электронном сканирующем микроскопе

Измерение записанного рельефа на рис. 2б показывает, что при взаимодействии лазерного излучения на пленку аморфного кремния формируется рельеф высотой 30–100 нм.

Источники

[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, Instrumentation and Data Processing / A.G. Poleshchuk, A.A. Kutanov, et al. // Allerton Press, Inc., 2010. — Vol. 46. — №2. — P. 171–180.

[3] 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. — 54 (1). — P. 333–342.

[4] Kutanov A. Direct laser recording on amorphous silicon film / A. Kutanov, I. Snimshikov, N. Sydyk uulu // Physics Procedia. — 2015. — 73. —P. 82–86.

[5] Патент №007874 Евраз. Устройство для записи дифракционных элементов / А.Г. Полещук, А.А. Кутанов, В.П. Бесмельцев, И.А. Снимщиков. — 2007, Бюл. №1.

System for interferometric lithography with direct laser recording on amorphous silicon film

A.A. Kutanov[1], A.G. Poleshchuk[2], I.A. Snimshikov[1], N. Sydyk uulu[1]

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

[2] Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Developed scanning system for interference lithography designed to form the diffraction microstructures consisting of microgratings of 5–10 μm with a given orientation and period varies in the range of 0.4–1.2 m, and the total field recording system 300×300 mm. 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 nanosecond pulse UV laser with $\lambda = 355$ nm. Results of research on the direct laser recording on amorphous silicon layer of interference filter using semiconductor single-mode Blu Ray laser with $\lambda = 405$ nm are presented.

Designed system for interference lithography and technology for direct recording of microgratings could be used to form a sub wavelength antireflective coating on the surface of large solar panels, graphic microstructures for embossing holographic manufacturing, as well as for the surface micro structuring by laser recording.

П.14 Техника, алгоритмы и особенности широкопольной и сканирующей голографической микроскопии

Ю.Н. Захаров
Центр перспективных исследований биомедицинского имиджинга и фотоники Гарвардского университета, Бостон, США
Радиофизический факультет Государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Цифровая голографическая микроскопия (ЦГМ) — бурно развивающееся направление, представляющее принципиально новый подход получения количественных данных микроскопии в различных областях применения. Широкопольная ЦГМ использует матричные фотосенсоры (ПЗС или КМОП камеры) для записи голограмм микроскопических изображений [1, 2].

Голографическая сканирующая микроскопия (ГСМ) [3, 4] совмещает принципы цифровой голографии и лазерной сканирующей конфокальной микроскопии.

Восстановление волнового фронта в широкопольной ЦГМ может быть выполнено алгоритмом двойного преобразования Фурье с фильтрацией в частотной плоскости, в то время, как ГСМ требует специальных алгоритмов восстановления [4].

В настоящей работе показывается возможность восстановления фазы волнового фронта. При этом, учитывается влияние конфокальной диафрагмы. Поэтому данная система называется конфокальная голографическая сканирующая микроскопия (КГСМ). Чтобы минимизировать хроматические и фазовые аберрации КГСМ и обеспечить механическую стабильность системы, основная часть оптического тракта, включая сканирующий модуль, собрана на базе промышленного лазерного конфокального сканирующего микроскопа и дополнена зеркалом опорного пучка, возвращающим луч, отраженный от светоделителя, направляя его на детектор. В качестве источника используется суперконтинуум, чтобы уменьшить продольную когерентность, определяющую длину, на которой происходит набег фазы. Принципиальная схема КГСМ представлена на рис. 1.

Следуя [5], можно представить один элемент разрешения конфокального изображения в виде

$$I_{s_{i,j}} = \int \left\{ \int p(\rho, z) R(\rho_i, \varphi_i, z) \left[\int p'(\rho - \rho') D(\rho') dp \right] \rho d\rho d\varphi \right\} dz, \tag{1}$$

где ρ, φ, z — полярные координаты, а z направлена по оптической оси, p — функция рассеяния точки объектива, p' — функция рассеяния точки объектива совместно с собирающей линзой, D — апертурная функция конфокальной диафрагмы, $R(\rho_i, \varphi_j, z)$ — комплексный коэффициент отражения объекта.

В результате, только свет, отраженный от объекта в пределах оптического среза толщиной T, вносит вклад в сигнал.

$$T = \sqrt{\left(\frac{0{,}88\lambda}{n - \sqrt{n^2 - NA^2}} \right)^2 + \left(\frac{1{,}4nD}{NA} \right)^2}, \tag{2}$$

где λ — длина волны, n — показатель преломления, NA — числовая апертура объектива.

Голограммная структура, представляющая собой результат интерференции сигнала из конфокального объема с опорным пучком, может быть выражена в виде

$$I = I_R + I_S + 2\sqrt{I_R I_S} \cos(\delta\varphi)\gamma(z), \tag{3}$$

где $\gamma(z)$ — функция когерентности источника света, z — оптическая разность хода, I_R и I_S — интенсивность опорного и объектного пучков соответственно, $\delta\varphi$ — фазовый набег объектного пучка на длине когерентности. $\delta\varphi = \delta\psi + \delta\upsilon$ состоит из набега фазы в объекте $\delta\psi = (2\pi/\lambda)nl_h$ и добавка, вызванного изменяющимся углом наклона сканирующего пучка $\delta\vartheta_{ij} = (2\pi/\lambda)\sin\alpha_{ij}\sqrt{(x_i^2 + y_j^2)}$, где α_{ij} — угол между оптической осью и направлением на точку с координатами в плоскости объекта x_i, y_j. $\sin\alpha = \dfrac{\sqrt{x^2+y^2}}{\sqrt{x^2+y^2+f^2}}$, f — фокусное расстояние объектива. Таким образом

$$I(x,y) = I_R + I_S(x,y) + 2\sqrt{I_R I_S(x,y)}\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{x^2+y^2}{R} + \frac{2\pi}{\lambda}n(x,y)l_h\right)\gamma(z) \tag{4}$$

выглядит как осевая голограмма сфокусированного изображения с точечным опорным пучком, расположенным на расстоянии $R = \sqrt{x^2+y^2+f^2}$ от голограммы.

Интенсивность опорного пучка I_R может быть записана в отсутствие объекта, а объектного I_S можно измерить, перекрыв затвором опорный пучок. Тогда можно восстановить фазовый набег:

$$\delta\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{I - I_R - I_S}{2\gamma(z)\sqrt{I_R I_S}}\right). \tag{5}$$

Поскольку фазовый набег определяется показателем преломления, устранив предварительно кривизну волнового фронта $\delta\upsilon$, можно получить распределение показателя преломления оптического среза:

$$n(x,y) = \frac{\lambda}{2\pi l_h}\delta\psi(x,y), \tag{6}$$

где l_h — длина, определяемая для конкретного случая длиной когерентности используемого источника света и глубиной конфокального объема.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ), грант 15-42-02658.

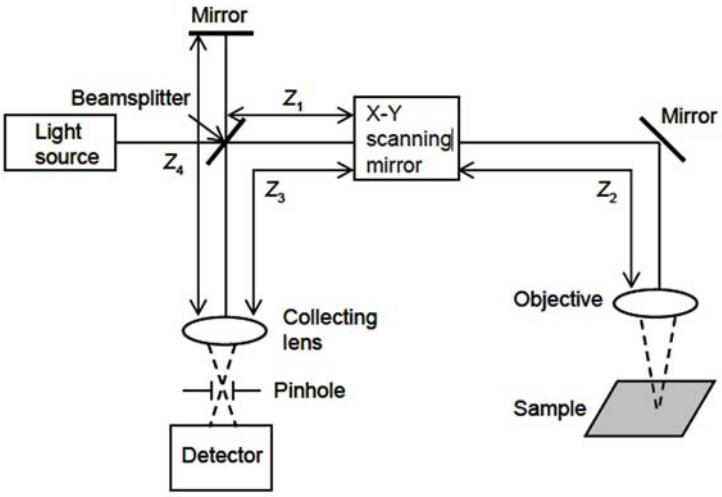


Рис. 1. Принципиальная схема конфокального голографического сканирующего микроскопа (КГСМ)

Источники

[1] Kim M.K. Principles and techniques of digital holographic microscopy // SPIE Reviews. — 2010. — 1. — P. 018005.

[2] Захаров Ю.Н. Голографические и интерферометрические методы и схемы в микроскопии живых клеточных структур // ГолоЭкспо-2011: Голография. Наука и практика (Минск, 2011). — С. 242–243.

[3] Захаров Ю.Н. Оптическая сканирующая голография и голографическая сканирующая микроскопия / Ю.Н. Захаров, В.В. Дуденкова, М.С. Муравьева // Труды 11-й Международной конференции «ГолоЭкспо-2014». Голография. Наука и практика (Сочи, 2014). — С. 124–131.

[4] Zakharov Y. Holographic scanning microscopy — novel approach to digital holography and laser scanning microscopy / Y. Zakharov, M. Muravyeva, V. Dudenkova, I. Mukhina, E. Vitkin, L.T. Perelman // Digital Holography and Three-Dimensional Imaging. — Optical Society of America, 2014. — P. DW5B-1.

[5] Webb R.H. Confocal optical microscopy // Rep. Prog. Phys. — 1996. — 59. — P. 427–471.

Techniques, procedures and features of widefield and scanning holographic microscopy

Yuri Zakharov
Center for advanced biomedical imaging and photonics, BIDMC, Harvard University, Boston, USA
Lobachevsky University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

Digital holographic microscopy (DHM) is an intensively developing technology of new paradigm in various fields of microscopy applications. Widefield DHM use matrix photosensors (CCD or CMOS cameras) to record hologram of microscopic image [1, 2].

Holographic scanning microscopy (HSM) [3, 4] combines digital holography with laser scanning confocal microscopy.

Wave front reconstruction in widefield DHM can be done by double Fourier transform with filtering in the space frequency domain, whereas the procedure for holographic scanning microscopy necessitate special reconstructing processing [4].

Here we take into attention influence of confocal pinhole to resulting signal and concentrate on interpreting of reconstructed wave front phase. So we call now our system confocal holographic scanning microscopy (CHSM). To minimize chromatic and phase aberrations of the CHSM system and to ensure its mechanical stability, the major part of the system optical train, including the confocal scanning unit, is based on a commercial laser scanning confocal microscope, while the remaining part of the optical path employs reference mirror that returns beam reflected from beamsplitter directing it to the detector. For illumination we employ the supercontinuum broadband source to reduce the temporal coherence length and, therefore, minimize the depths contributing to the phase shift. The details of the CHSM system design can be seen in Fig. 1.

Following [5] we present one resolution element of confocal microscope image as

$$I_{s_{i,j}} = \int \left\{ \int p(\rho, z) R(\rho_i, \varphi_i, z) \left[\int p'(\rho - \rho') D(\rho') dp \right] \rho d\rho d\varphi \right\} dz, \quad (1)$$

where ρ, φ, z are polar coordinates and z directed along optical axis, p is point spread function of objective, p' is point spread function of objective conjointly with collecting lens, D is aperture function of pinhole and $R(\rho_i, \varphi_j, z)$ is complex function representing sample.

In result, only light reflected from objects inside optical slice which thickness is equal to T gives essential contribution to signal.

$$T=\sqrt{\left(\frac{0{,}88\lambda}{n-\sqrt{n^2-NA^2}}\right)^2+\left(\frac{1{,}4nD}{NA}\right)^2}, \tag{2}$$

where λ is wavelength, n is refractive index, NA is objective numerical aperture.

The signal on the detector collected from the confocal volume of the microscope and interfered with reference can be expressed as

$$I=I_R+I_S+2\sqrt{I_R I_S}\cos(\delta\varphi)\gamma(z), \tag{3}$$

where $\gamma(z)$ is the optical coherence function, z is optical path difference, I_R and I_S are the signals in the reference and the sample arms of the system respectively, and $\delta\varphi$ is the phase shift accumulated within the coherence length. $\delta\varphi = \delta\psi + \delta\upsilon$ consists of phase incursion in the object $\delta\psi = (2\pi/\lambda)nl_h$ and addition caused by changing incidence of illumination beam during scanning $\delta\vartheta_{ij}=(2\pi/\lambda)\sin\alpha_{ij}\sqrt{(x_i^2+y_j^2)}$, where α_{ij} is angle between optical axis and direction to the point with coordinates in the sample plane x_i ,y_j. $\sin\alpha=\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\sqrt{x^2+y^2+f^2}}$, f is objective focal length. So

$$I(x,y)=I_R+I_S(x,y)+2\sqrt{I_R I_S(x,y)}\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{x^2+y^2}{R}+\frac{2\pi}{\lambda}n(x,y)l_h\right)\gamma(z) \tag{4}$$

looks as on-axis image plane hologram with point reference source situated at the distance $R=\sqrt{x^2+y^2+f^2}$ from hologram.

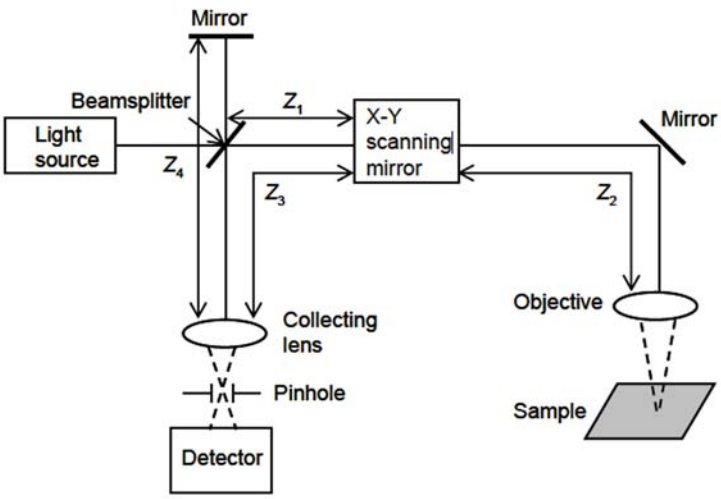


Fig. 1. Schematic of the confocal holographic scanning microscopy (CHSM)

The signal in the reference arm, I_R, can be prerecorded with the sample removed, while the signal in the sample arm, I_S, can be measured with the shutter in the reference arm closed. Then we can reconstruct phase shift

$$\delta\varphi=\cos^{-1}\left(\frac{I-I_R-I_S}{2\gamma(z)\sqrt{I_R I_S}}\right). \tag{5}$$

Since the phased shift depends on the refractive index, previously eliminating residual curvature of wave front $\delta\upsilon$, we can obtain distribution of refractive index in optical slice

$$n(x,y)=\frac{\lambda}{2\pi l_h}\delta\psi(x,y), \tag{6}$$

where l_h is length determined by the coherence length and the confocal depth of focus.

Acknowledgements: The study is supported by RFBR grant 15-42-02658.

References

[1] Kim M.K. Principles and techniques of digital holographic microscopy // SPIE Reviews. — 2010. — 1. — P. 018005.

[2] Zakharov Yu. Holographic and interferometric approaches and techniques as applied to live cells microscopy // HoloExpo'2011: Holography. Science and practice (Minsk, 2011). — P. 242–243.

[3] Zakharov Y. Optical scanning holography and holographic scanning microscopy / Y. Zakharov, V. Dudenkova, M. Muravyeva // Proceedings of the 11th International conference "HoloExpo'2014". Holography. Science and practice (Sochi, 2014). — P. 124–131.

[4] Zakharov Y. Holographic scanning microscopy — novel approach to digital holography and laser scanning microscopy / Y. Zakharov, M. Muravyeva, V. Dudenkova, I. Mukhina, E. Vitkin, L.T. Perelman // Digital Holography and Three-Dimensional Imaging. — Optical Society of America, 2014. — P. DW5B-1.

[5] Webb R. Confocal optical microscopy // Rep. Prog. Phys. — 1996. — 59. — P. 427–471.

Устные доклады
Секция №1

Технологии в области защитных голограмм

Oral presentations
Section №1

1.1 Поиск контрастных плоских изображений объектов востановленных из цифровых голограмм методом минимизации энтропии

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

При численном восстановлении цифровой голограммы, объемные объекты могут быть представлены набором плоских сечений. Если объекты малы по сравнению с размерами поверхности регистрации и регистрируемым объемом, то расстояния при восстановлении наиболее контрастных изображений соответствуют их положению в пространстве. В основе предлагаемого метода поиска положений фокусировки лежит вычисление информационной энтропии плоских изображений.

Введение

Одной из перспективных областей применения цифровой голографии является наблюдение микрообъектов. При разработке программного инструментария для автоматизации процесса извлечения информации из цифровых голограмм применяются различные методы. В данной работе исследуется применимость метода минимизации энтропии.

В [1] был предложен метод фокусировки основанный на вычислении информационной энтропии для определения положения объектов, и проведена проверка его эффективности на математических моделях.

Задачей данного исследования был анализ эффективности метода минимизации энтропии для реальных голограмм. Решались задачи проверки применимости метода для различных цифровых голограмм и оптимизации процесса обработки и извлечения информации.

Метод минимизации энтропии

При восстановлении оптической цифровой голограммы, можно получить модель голографируемого пространства в качестве 3-мерной матрицы, каждая ячейка которой заполнена числами, отвечающими за яркость соответствующей точки (пространства). Эту 3-мерную матрицу, можно представить набором 2-мерных матриц, которые представляют собой сечения параллельные плоскости голограммы, и при этом являются изображениями в цветовом режиме градаций серого. Поиск сфокусированного изображения подразумевает выявление тех сечений, на которых искомый объект наиболее контрастный.

В теории информации энтропия является мерой неопределённости или непредсказуемости информации. В изображениях, или 2-мерных матрицах энтропию можно использовать в качестве меры случайности или уровня хаоса значений градаций яркости. Таким образом для восстановленного изображения $r(x, y)$, можно вычислить его энтропию следующим образом (формула (1) описана в [2]):

$$E = -\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} p(m,n)\ln p(m,n), \tag{1}$$

где

$$p(m,n) = \frac{|r(m,n)|^2}{P}$$

и

$$P = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\left|r(m,n)\right|^2$$

для изображения размерами $M \times N$ E — энтропия изображения; P — общая мощность изображения; $r(m, n)$ — значение пикселя в позиции (m, n); $p(m, n)$ — отнормированное значение пикселя; E — энтропия изображения.

Используемые голограммы и математические принципы

При проведении эксперимента использовались голограммы из 3-х различных лабораторий:

- Цифровые голограммы, предоставленные Томским государственным университетом. Имели размер 1024×1024 пикселя. Более подробно способ получения голограмм изложен в [3].

- С помощью макета осевой оптической схемы записи были получены цифровые голограммы. В качестве среды регистрации использовалась камера Sony α7R, а в качестве когерентного источника выступал газовый He–Ne лазер с длиной волны 632 нм. Колимированный лазерный пучок просвечивал объекты, попадая на матрицу фотоаппарата.

- Цифровые голограммы предоставленные Московским государственным машиностроительным университетом, полученные с помощью макета голографического Фурье-спектрометра [4]. В качестве регистрируемых объектов выступали две стеклянные микроскопные окулярные шкалы. Более подробно процесс записи голограммы данных объектов, а так же параметры восстановления описаны в работе [5].

Восстановление цифровой голограммы, зарегистрированной в осевой схеме, основано на расчёте дифракционного интеграла Кирхгофа в приближении Френеля [6]. Приближение Френеля справедливо, когда размер ПЗС-матрицы, используемой для голографической регистрации частиц, много меньше расстояния от неё до регистрируемой плоскости объекта.

$$u(\xi,\eta) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} I(x,y)\, e^{\frac{ik}{2z}\left((x-\xi)^2+(y-\eta)^2\right)}\, dxdy, \qquad (2)$$

где (x, y) — плоскость голограммы, (ξ, η) — плоскость изображения, λ — длина волны, k — волновое число, $I(x, y)$ — распределение интенсивности картины интерференции предметной и опорной волн на этапе регистрации, $u(\xi, \eta)$ — комплексная амплитуда в плоскости восстановления, z — расстояние.

Имея распределение комплексной амплитуды в плоскости (ξ, η), с помощью соотношения (3) рассчитывается распределение интенсивности в этой плоскости.

$$I(\xi,\eta) = u(\xi,\eta)u^*(\xi,\eta) = \left|u(\xi,\eta)\right|^2. \qquad (3)$$

Для получения набора сечений исследуемого образца рассчитывались $I(\xi,\eta)$ при различных расстояниях z.

При работе с голограммами, предоставленными Томским государственным университетом в качестве объектов выступали случайные пузыри воздуха в сосуде с водой. После записи голограммы, приведённой на рис. 4, она была восстановлена в диапазоне расстояний 80–200 шагов. Далее были определены изображения, где пузыри были чёткими. Например, при восстановлении голограммы с рис. 4, таковыми оказались изображения на 123, 127, 140, 142, 148, 154, 160, 169 и 182 шагах. На рис. 5 представлено изображение на расстоянии 154 шага, а на рис. 6 приведен график зависимости энтропии от расстояния для данной голограммы.

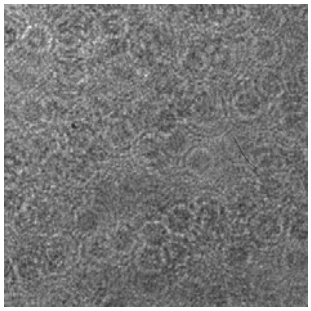


Рис. 4. Голограмма, записанная по осевой схеме

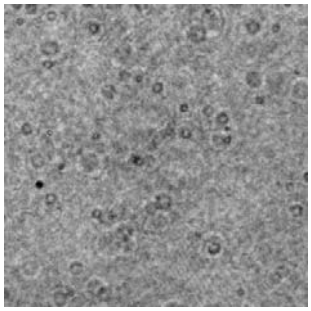


Рис. 5. Восстановленное изображение, голограммы на 154 шаге

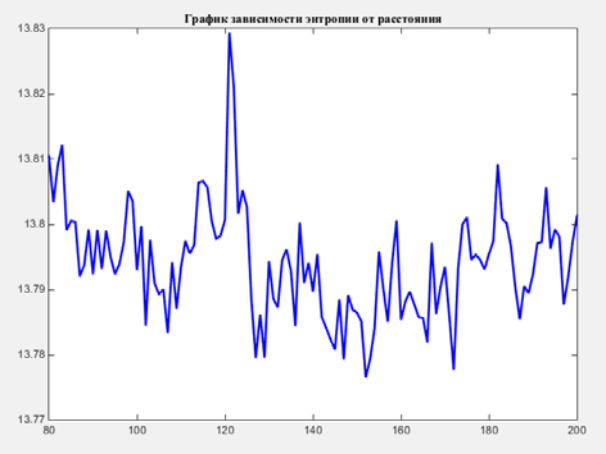


Рис. 6. График зависимости энтропии от расстояния

Как можно видеть, локальные минимумы не совпадают с контрастными сечениями, восстановленными с голограммы, а информативность приведённого графика неудовлетворительна. Данный эксперимент был проведён с большим количеством различных голограмм, но так и не позволил утверждать, что четкие изображения, восстановленные с цифровой голограммы, совпадают с минимумами энтропии соответствующих изображений. Данный результат, послужил поводом продолжить исследования. Был собран макет для записи осевой голограммы. Производилась регистрация 3-х точек на прозрачном стекле на расстояниях 0,60 м, 1,12 м, 1,57 м и 2,38 м от плоскости регистрации. Во время восстановления проводилось масштабирование в плоскости восстановления, таким образом, чтобы области получаемых изображений были равны на любых расстояниях. Для голограммы зарегистрированной на расстоянии 2,38 м было проведено восстановление в диапазоне 1,5–2,765 м с шагом в 5 мм. На рис. 7 приведена голограмма и восстановленный объект, а на рис. 8 график зависимости энтропии от расстояния.

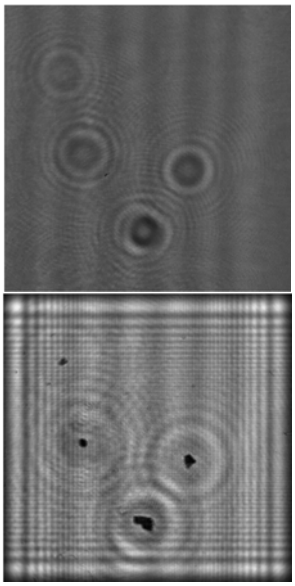


Рис. 7.Голограмма и её численное восстановление на расстоянии 2,38 м

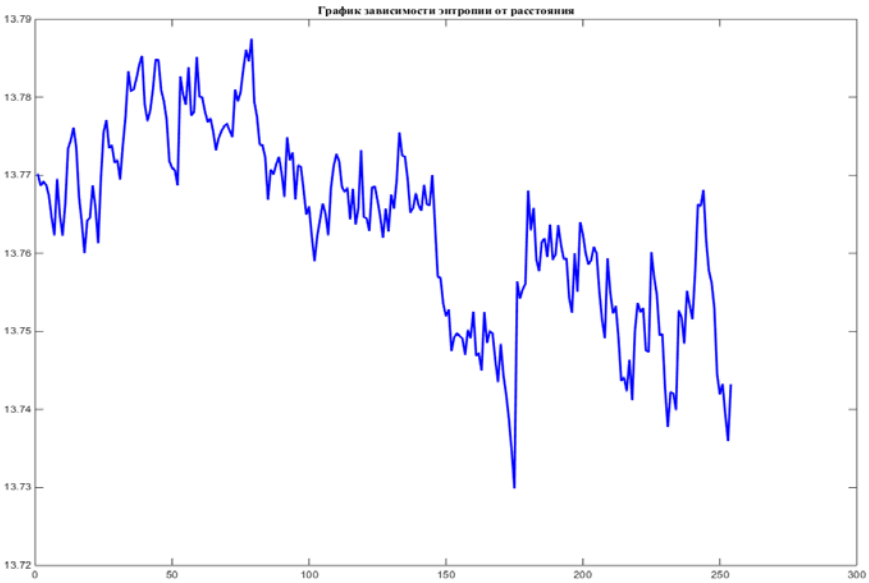


Рис. 8. График зависимости энтропии от расстояния для цифровой голограммы, зарегистрированной на расстоянии 2,38 м

Расстояние на графике приведено в условных единицах: нулю соответствует расстояние 1,5 м, расчетный шаг 0,005 м; таким образом значению 50 условных единиц соответствует 0,25 м. Как можно видеть минимум графика действительно совпадает с фокусом 2,38 м. Кроме того следует отметить, что существуют и другие локальные минимумы, а после прохождения дистанции наилучшей резкости энтропия убывает. На других голограммах минимум энтропии не совпадал с расстоянием наилучшей резкости, но находился вблизи (различался не более чем на 0,025 м). Такие результаты требуют дальнейшего исследования и теоретического обоснования.

При регистрации цифровых интерферограмм, с помощью макета представленного в [4], использовались методы фурье-микроскопии, развитие и подробное описание которых приведено в [7, 8]. В качестве регистрируемых объектов выступали две стеклянные микроскопные окулярные шкалы. Более подробно процесс записи голограммы данных объектов, а также параметры восстановления описаны в работе [5]. Записанная интерферограмма была восстановлена в диапазоне 450–600 шагов. На рис. 9 представлены восстановленные изображения, объектов. А на рис. 10 можно наблюдать график, отображающий зависимость энтропии от расстояния для данного случая.

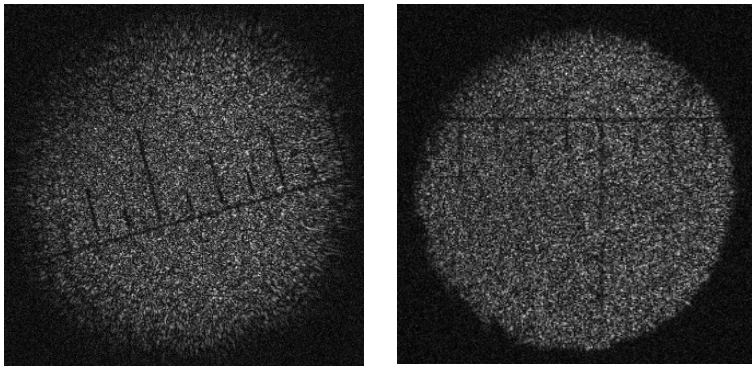


Рис. 9. Восстановленные изображения гиперспектральной голограммы на 489-м и 555-м шаге соответственно

На данном графике, можно наблюдать несколько локальных минимумов. Наиболее явно из них выражены три. Первые два соответствуют расположениям объектов (шкал), а изображение, располагающееся на 576-м шаге, представляет собой оптическую грязь на тыльной стороне стекла со шкалой.

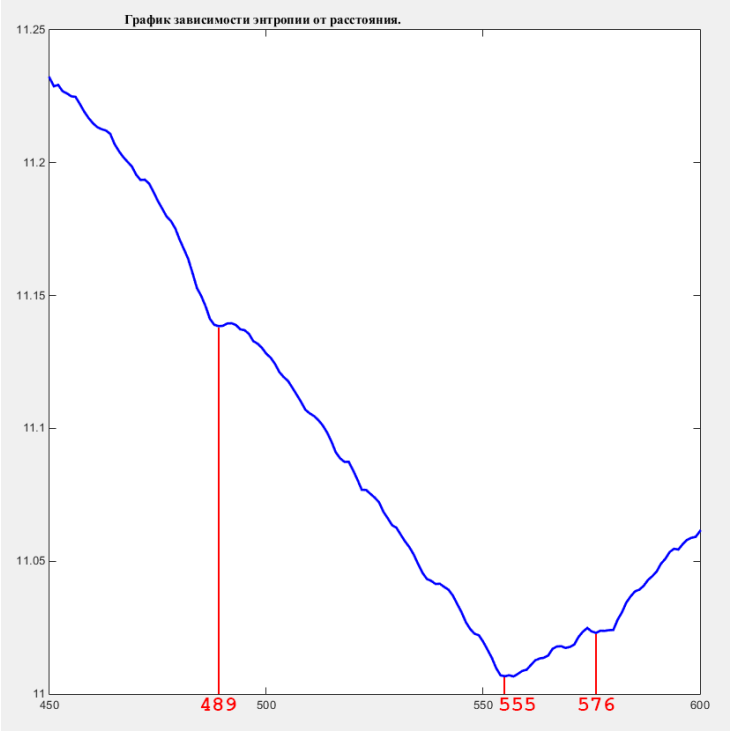


Рис. 10. График зависимости энтропии от расстояния

Данный эксперимент проводился 6 раз, с интерферограммами полученными для разных длин волн [4]. По результатам можно сделать вывод об удовлетворительной возможности оценки положения объектов по сопоставлению с локальными минимумами зависимости энтропии от расстояния для данного типа голограмм.

Заключение

В результате проведённого исследования разработан программный инструментарий позволяющий получать восстановленные изображения цифровой голограммы на разных расстояниях в виде плоских сечений. Одновременно с помощью (1) проводился поиск наиболее контрастных изображений по минимумам информационной энтропии.

В связи с неоднозначными результатами предложенный в работе метод можно охарактеризовать как неточный. Отличительную эффективность работы метода с голограммами, полученными на макете Фурье-спектрометра, можно связать с избыточной информативностью характерной для данного типа голограмм [8]. Можно резюмировать, что метод применим в тех случаях, когда объектов записи мало и их размер много меньше размеров поверхности матрицы. Для детальной оценки применимости потребуются дополнительные исследования.

Явное преимущество метода в его быстродействии может быть использовано как предварительный анализ интервалов возможного наблюдения объектов перед дальнейшим исследованием более точными, но менее быстрыми методами.

Авторы выражают признательность Каленкову С.Г., Каленкову Г.С., Каменеву Д.В. и Ольшукову А.С. за конструктивные дискуссии и предоставленные объекты исследования.

Источники

[1] Ren Z. Autofocusing of Optical Scanning Holography Based on Entropy Minimization / Z. Ren, N. Chen, A. Chan, E.Y. Lam // Digital Holography & 3-D Imaging Meeting, OSA Technical Digest. — Optical Society of America, 2015. —P. DT4A.4.
[2] Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // University of Illinois Press, 1998.
[3] Dyomin V.V. Two-dimensional representation of a digital holographic image of the volume of a medium with particles as a method of depicting and processing information concerning the particles / V.V. Dyomin, D.V. Kamenev // Journal of Optical Technology. — 2013. — Vol. 80. — №7. — P. 450–456.
[4] Kalenkov G.S. Hyperspectral holographic Fourier-microscopy / G.S. Kalenkov, S.G. Kalenkov, A.E Shtan'ko // Quantum Electronics. — 2015. — 45 (4). — P. 333–338.
[5] Kalenkov S.G. Hyperspectral digital holography of microobjects / S.G. Kalenkov, G.S. Kalenkov, A.E Shtanko // SPIE Proc. — 2015. — Vol. 9386. — P. 2085259.
[6] Гудмен Д.Ж., Введение в Фурье-оптику / пер. с английского Галицкого В.Ю., Головея М.П. — Под ред. Косоурова Г.И. — М.: «Мир», 1970. — 359 с.
[7] Kalenkov S.G. Modulation microscopy and nonmonochromatic light hologram recording / S.G. Kalenkov, G.R. Lokshin // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2013. — №58 (3). — P. 217–220.
[8] Kalenkov G.S. Hyperspectral Holographic Fourier-Microscopy / G.S. Kalenkov, S.G. Kalenkov, A.E Shtanko // Imaging and Applied Optics. OSA Technical Digest (online). — 2014. — P. DTh3B.7.

Search flat contrasting images of objects restoration of digital holograms by minimizing entropy

B.W. Kaytukov, V.A. Kiselev, A.V. Yanovsky
FSUE “STC “Atlas”, Moscow, Russia

In the numerical reconstruction of digital holograms, three-dimensional objects can be represented by a set of flat sections. If the objects are small compared with the size of the surface of the desk, and a recorded volume, the distance in the reduction of the most contrast images correspond to their position in space. The proposed method of searching for the focus of the provisions on the calculation of information entropy of planar images.

One of the promising applications of digital holography is the observation of microscopic objects. Various methods are used in the development of software tools to automate the process of extracting information from digital holograms. In this paper we investigate the applicability of the method of minimizing entropy.

In [1], the focus method was proposed based on the calculation of information entropy to determine the position of objects, and checked its effectiveness on mathematical models.

The aim of this study was to analyze the effectiveness of the method of minimizing entropy for real holograms. We solved the problem of testing the applicability of the method to a variety of digital holograms and optimize the processing and retrieval of information.

1.2 Программное обеспечение «RainBow» для получения полноцветных изображений в защитных голограммах, OVD-структур и микро-нанооптических элементов с помощью электронно-лучевой литографии и лазерной аппаратуры Dot-Matrix-DLW

А.А. Свинцов, С.И. Зайцев
Институт проблем технологии микроэлектроники Российской академии наук, Черноголовка, Россия

True color rainbow hologram, OVD, micro-nanooptics… by s/w "RainBow" via high throughput EBL, Dot-Matrix and DLW

A.A. Svintsov, S.I. Zaitsev
IMT RAS, Chernogolovka, Russia

Electron Beam Lithography (EBL) is recognized Ref. 1 as the powerful technology for DOVIDs providing the highest level of optical security and counterfeit deterrence based on unprecedented level of EBL resolution, quality and flexibility. Last years EBL demonstrates increasing in throughput with simultaneous decreasing of ownership costs. In spite of large amount of companies declare usage of EBL in DOVIDs production to our knowledge there is no any commercially available software for design and optimization of DOVIDs, even distinct description of physical (optical) and technologic principles of the DOVIDs design and fabrication is absent. This report presents software system RainBow recently developed Ref. 2, 3 for design and optimization of digital rainbow hologram, real holograms, optically variable devices and nano-micro-optics. Initially RainBow was developed for budgetary EBL based on SEM column Ref. 4 but now RainBow is able to prepare data to be used by wide variety of tools including industrial lithographs (like VISTEC, Voyager), Dot(Image)-Matrix and Direct Laser Writing (DLW) machines. Examples of holograms will be presented to demonstrate RainBow successful operation with these different writing technologies. It is demonstrated that specially developed EBL procedure allows reaching throughput of several centimeters squared per hour.

The system allows creating DOVIDs with standard set of effects and overt/covert features

- True-Color (RGB) hologram + all effects below
- Flat color rainbow hologram with switching effect
- 2D, 2D/3D — several flat levels with varied depth
- 3D-stereogram
- kinematic effects
- microtext (up to sub-micron sizes)
- LetterInLens (kind of DOE)
- Fresnel lenses (20mm and more)
- Hidden holographic image

Much like in a color TV with three luminescent spots per single screen pixel, each color pixel of initial image is transferred by RainBow into three (R, G, B) diffractive gratings in a hologram. Change of either duty cycle or area of the gratings are used to provide proper R, G, B intensities. Several unique features distinguish the software developed from other DOVID design systems.

- An automatic function provides stability of colorization at hologram inclination via equalizing of angular blur from individual R, G, B gratings. On base RGB gratings and color stability a new security element True Grey-Scale image is developed.

- Special algorithm optimizes area to be filled with gratings for hologram brightness enhancement.

- Algorithms of so-called Y(X) correction allow designing large hologram considering local conditions of light diffraction by each grating

But maybe the most important feature is RainBow simulation subsystem. At design RainBow generates a file of geometry data (size, shape, spacing of strips of each diffractive gratings). Only the geometry is used to simulate diffraction and visible image. This allows not only simulate observation of hologram at different angles but also consider large variety of external and technologic parameters like specter of light source, refraction index, grating height, errors of lithography. Results of simulation allow estimate quality of future hologram before real fabrication, on the other hand it helps to find optimal technologic parameters.

Special sub-system "NM-Combi" allows easily combine DOVIDs elements (rainbow and real holograms, OVD, nano-micro-optics...) in one file of exposure data providing suitable and flexible tool to aggregate security elements. "RainBow" adopts variety of data formats (vector or bitmap) so results of other design systems could be incorporated and combined.

1.3 Эффективные публичные признаки защитных голограмм

С. Захаровас[1], Р. Баканас[1, 2], А. Булановс[3], В. Варадараджан[4]
[1] Геола Дигитал ЗАО, Литва
[2] Каунасский Технологический Университет, Литва
[3] Даугавпилский Университет, Латвия
[4] Игнетта Голографикс Пвт. Лтд., Индия

Effective public security features for embossed holograms

S. Zacharovas[1], R. Bakanasa[1, 2], A. Bulanovsc[3], V. Varadarajand[4]
[1] Geola digital UAB, Vilnius, Lithuania
[2] Department of Materials Engineering, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania
[3] Innovative Microscopy Center, Daugavpils University, Daugavpils, Latvia
[4] Ignetta Holographics Pvt. Ltd., Coimbatore, India

New combined embossed hologram originating technique was developed by the international team of holography experts. The technique merges deep 3D holographic images with commonly used hologram security features. Deep 3D images were first recorded on photoresist with Geola's holographic printer containing their proprietary pulsed laser. Optical security features were then overexposed onto the photoresist plates containing latent images of deep 3D scenes. The photoresist plates with several exposures (containing optical security features and deep 3D images) were developed. Embossed holograms, containing such effective public security features as full colour 3D images, guilloches, rainbow patterns were manufactured. Manufactured embossed holograms also contained such optical security features as microtext and laser readable hidden image.

1 Introduction

Holograms, which have started their life in consumer market as three-dimensional images on a flat medium, are nowadays widely used for security applications in the form of embossed holograms. Embossed hologram is essentially a transmission hologram embossed on a reflective surface, thus appearing for the observer first of all as a shiny object. Then, observer may or may not to distinguish the image visible on this shiny surface at all. This means that common people who do not have optical aids cannot identify if they are seeing the real security hologram, or its imitation.

At the very beginning of employing transmission holograms as a security marks in the form of embossed hologram, those marks contained three-dimensional images recorded on master-holograms in analogue way from real objects. At that time the three-dimensional image was a security feature by itself. With the digital embossed holograms originating techniques developing, various microscopic optical features contained in embossed holograms were becoming more and more sophisticated. Somewhere on the road, embossed holograms for security applications mostly lost three-dimensional images. Some remaining three-dimensional images on few security holograms are very shallow so can be imitated by a flat image.

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 transparences.

So, all modern embossed holograms originating techniques, except DI-HO do not provide origination of deep three-dimensional image on embossed hologram. Any of those widely used techniques do not allow obtaining deep three-dimensional image AND sophisticated optical security features. Thus we have seen the problem and herebelow we are proposing a solution.

The solution we are proposing is a combination of novel master-original writing technique with conventional dot-matrix and/or image-matrix techniques.

2 Direct writing of holographic deep 3d image

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.

2.1 Acquiring images for deep 3D hologram

The writing of holographic deep 3D image starts from 3D scene's images acquisition. Since Geola's direct hologram writing essentially produces an ensemble of holographic optical elements which is acting as a conventional stereogram — the images acquisition process is similar to image acquisition process for classical stereogram [1]. The real or virtual camera is running in front of the scene and imaging the scene under different viewing angle — Fig. 1.

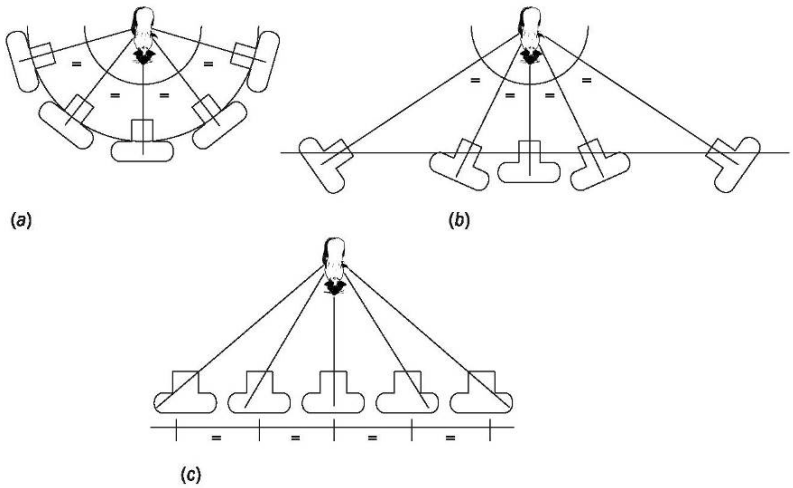


Fig. 1. Three ways of doing imaging for a stereogram. In (a) the camera or object rotate and remain at a constant distance. In (b) camera always points at the subject, but moves along a straight line with equal angles between exposures. In (c) camera moves along a straight line, but its optic axis remains orthogonal to the subject plane, with equal distance between expo-sures.

Actually for the right perspective of all details of the 3D scene imprinted onto hologram the images should be acquired as per scheme (c) at Fig. 1. So the images, acquired as per schemes (1) and (2) at Fig. 1, shall be transformed so they would be similar to those acquired as per scheme (c). That can be performed ether employing proprietary Geola's software, or by projecting acquired

images onto flat plane in 3D CAD software and rendering those with virtual camera run as depicted in scheme (c) at Fig. 1. The resulting sequence of parallax-related images can be used for H1 hologram recording followed by H1 — H2 transfer, also it can be used for direct hologram writing without intermediate step of H1 hologram recording.

2.2 Direct deep 3D hologram writing

Direct deep 3D hologram writing is happening by recording not the whole hologram at once, but recording one by one its elemental parts instead. So the resulting hologram consists from ensemble of elemental parts — Fig. 2.

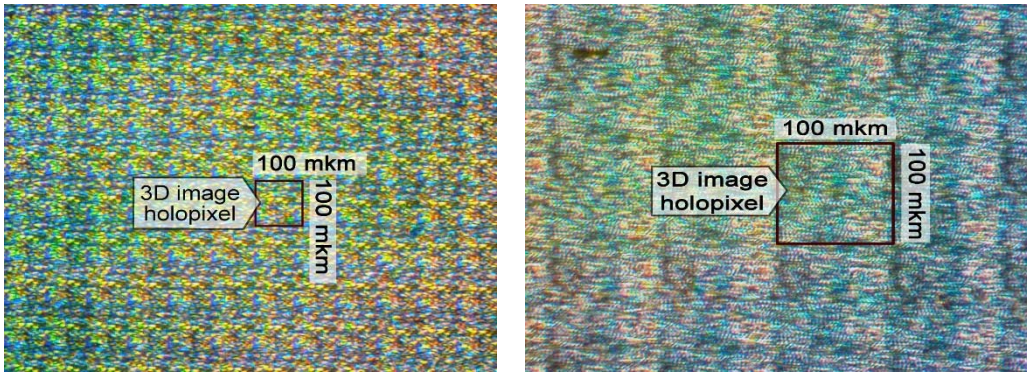


Fig. 2. Microphotographs of embossed 3D image hologram originated with Geola's digital holographic printer

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 viewing 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 μm. To record hogel which would be seen differently from different viewing angles Geola is using the universal elemental hologram recording scheme shown in Fig. 3.

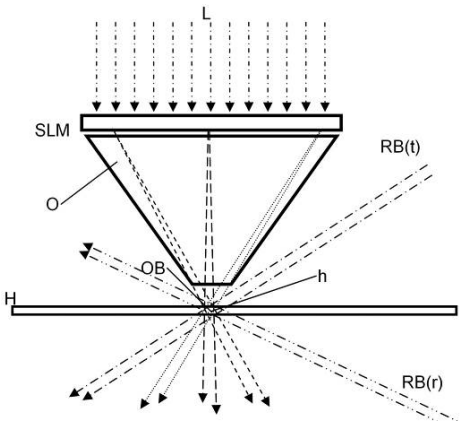
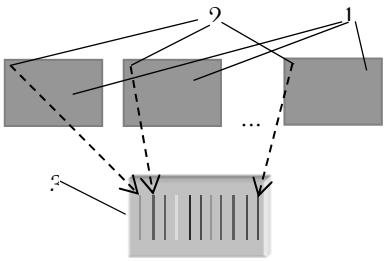


Fig. 3. Writing a hogel for a direct-write digital hologram. L is the laser beam, OB the object beam, RB(t) and RB(r) the reference beams for transmission and reflection holograms respectively; h is a hogel, H is the white-light reflection or transmission hologram.

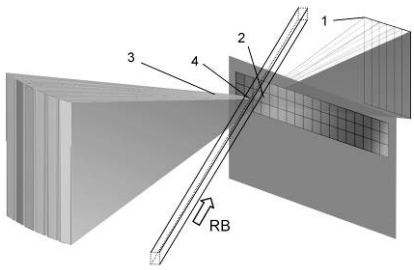
The employed objective has focal point outside of its physical dimensions. Near focal spot, the beams have size almost equal to focal spot size and keep their directions. Adding reference beam, the hogel is recorded — a holographic optical element which illuminated will replay light beams into directions from where light beams came during its recording. Those directions are defined by the image shown on spatial light modulator during each particular hogel recording. The process of image for direct holographic printing preparation is called pixel-swap.

2.3 Pixelswap — images for each hogel preparation

From the set of digital parallax-related images all the pixels with the same coordinates are taken and combined into a new composite image. This image is projected on the SLM and a hogel with the same coordinates as those of the collective pixels is recorded. If one has, for example, a sequence with an image consisting of 640×480 pixels, one can print a hologram from it having 640×480 hogels too, i.e. if each hogel has a width of 100 μm, the resulting complete hologram will be 64×48 mm. The hogel with coordinates (0, 0) will contain all the pixels with coordinates (0, 0) from all images in sequence. The hogel with coordinates (0, 1) will contain all the pixels with coordinates (0, 1) and so on. And when viewer will change his viewpoint in front of the final hologram by a small amount, e.g. from the viewpoint where the first image was taken to the viewpoint where second image was taken, he will then perceive the pixel with coordinates (0, 1) as it was on the image of the 3D scene taken from this particular angle instead of the pixel (0, 0). Similarly, the hogel with coordinates (0, 2) will show us all the pixels with coordinates (0, 2), and so on. Thus the whole direct-write digital hologram viewed from different angles will show us the images of the 3D scene taken from different angles. The images for hogels recording have structure similar to barcode structure — hogels recorder from those images will produce different light intensities under different horizontal viewing angles and same intensities into vertical angles — Fig. 4 and 5.



1 — series of parallax related images of the 3D scene,
2 — pixels having the same coordinates,
3 — combined image to be displayed on the SLM
Fig. 4. Principle of hogel image formation on SLM for a digital holographic print with horizontal-only parallax



1 — is the SLM, 2 — the principal focus (behind hogel), 3 — the FOV of individual SLM pixels from hogel; 4 — the hogel recording position just downstream of the focus; RB is the reference beam
Fig. 5. Hogel formation for a single parallax digital holographic print

For transmission holograms the images shown on the SLM contain narrow strip (s), just like the H1 master hologram for analogue white light transmission hologram contain few millimeters width strips. For a monochrome hologram the master would appear as a single narrow strip; for color there would be three narrow strips, and for an achromatic hologram a single wide strip — Fig. 6. The same applies to holographic prints, but now with this technique one can record all three types of holograms on the same medium, as seen from different viewing angles. And there is even possible to have some image details appearing achromatic, while others are monochrome or full color, something that cannot be achieved using the classical analogue holography approach.

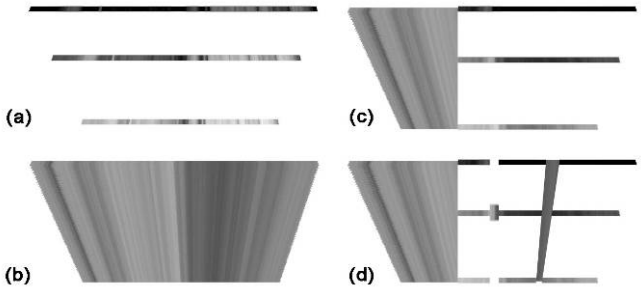


Fig. 6. Images as they appear on the SLM for one hogel of holographic print: for color (a), achromatic (b), combined image (c) as viewed from one side as achromatic and from the other as full color, (d) as (c) but containing monochrome and achromatic image elements

3 Direct writing of optical security features

As was noted above, currently there are three direct hologram writing technology widely used in hologram origination and providing wide range of optical security features: Dot-matrix, Image-matrix and e-beam Lithigraphy. Let's make a brief overview of said technologies without touching the details of their implementation.

Dot-matrix recording technology allows creating microstructures relief due to the interference of two or more laser beams (usually no more than 4) focused to the point in size of a few microns. Thus the possibilities of this technology are limited to recording diffraction gratings with following variable parameters: frequency, the orientation angle and relief height. In our opinion, dot-matrix technology is not withstanding a competition in the security holograms market and gradually is losing ground. Nevertheless, dot-matrix technology was very good for its time and gave a powerful impetus to the development of image-matrix and other close technologies.

Currently Image-matrix direct hologram writing technology is still promising and not yet exhausted its potential. There are usually two working modes in image-matrix machines. The first one is the interference optical lithography (so called holographic mode), it implements multi-beams interference and can provide results similar to Dot-matrix. That it — in those machines the light beam, modulated by the images projected onto spatial light modulator, is converted to few beams. They are sent to photosensitive media from different directions and by interfering are producing diffractive patterns. In Geola's holographic printer, discussed in previous section, a non-modulated reference beam is interfering with the light beam modulated by the image projected onto spatial light modulator.

Image-matrix allows one to obtain structures similar to obtainable with Dot-matrix, but it also allows one to create other diffractive microstructures, distinctive from the diffraction gratings; and also allows to control all of their parameters. The structures most common in practice are axicon grating, 2D grating, scattering microstructures and etc.

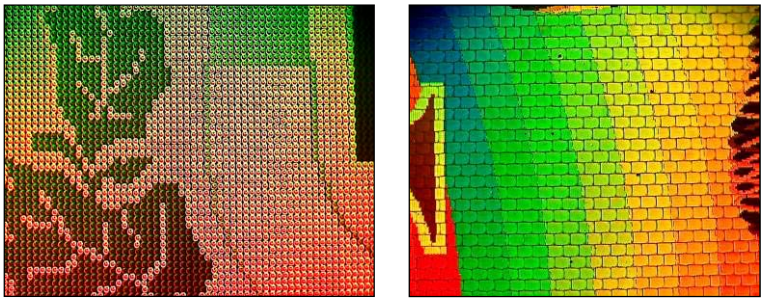


Fig. 7. Photographs of microstructures of dot-matrix (a) and image-matrix (b) holograms recorded on photoresist

The second mode is a projection optical lithography (so called lithographic mode), which is often combined with the first one in commercially available devices (Kinemax, DifX). It is mainly used for recording of Fresnel lenses or free form metallic emboss effects with help or kinoform microstructures and a lot of other achromatic visual effects. This mode also can be used for image hologram recording, if one is patient enough to calculate necessary interference pattern [2, 3]. The usual patterns of dot-matrix and image matrix holopixels are shown in Fig. 7 [4].

A bit aside from the mainstream origination business stays e-beam lithography. The distinctive feature of e-beam lithography is a high quality hologram microstructure formation and the ability to create sub-micron relief elements, which is problematic for optical recording technology. However, image-matrix and e-beam lithography technologies rarely compete with each other on the hologram origination market, as they are used in different areas of holographic business. If we are not taking into account the quality of the micro-relief (here e-beam is definitely the leader) the possibility of e-beam and image-matrix technology are, in general, comparable. But image-matrix direct writing technology has significantly lower cost; it does not require high skills of working staff and still has great potential for development. In our opinion, this technology will remain highly employed in the current decade.

In this work for this work optical security features writing we have used two hologram originating machines:

- DifX hologram mastering system.
- Kinemax

Since Kinemax hologram originating system is well-known, below we will briefly review a newly emerging at the market DifX machine.

3.1 DifX hologram mastering system

This hologram origination equipment was developed Dr. A. Bulanovs in scientific laboratory of Daugavpils University and now is available as commercial product — Fig. 8.

Fig. 8. DifX hologram mastering system

Both modes of operation, usual for image-matrix machines, are present in this apparatus. 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 are recorded in this operation mode (e.g. color motion, kinetic motion, true color 2D, true color multi-layer 2D/3D, true color stereograms, hidden images, holographic emboss effect, axicon grating, 2D grating, scattering microstructures and etc.). In lithographic mode one can record special design and/or security effects, such as images composed of symmetric or blazed grating with low frequency 1–500 lines

per mm, Fresnel lenses, direct image projection on photoresist with high resolution, free form 3D metallic relief effects implemented with help of kinoform microstructures. As a new security feature, machine has the possibility to use any bitmap image to fill the pixels in both recording modes. This option allows achieving such special effects as diffuse white area, axicon gratings (visible at any angles), micro text with size down to 5 μm, and a lot of other features. It is also possible to combine all hologram types and effects in any variations during design preparation.

Methods and materials

As photosensitive medium we have used photoresist plates supplied by Geola. The plates were specially manufactured for Geola by coating an analogue of Shipley photoresist to glass pates in size of 250×200mm or 300×200mm. The coating was performed employing blade coating method.

As photoresist developing agent we have used Microposit developer AZ303, diluted with deionized water in proportion 1:9. Developing time was 25–30 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. Therefore we stuck with Microposit developer AZ303, which probably has some ingredients preventing developer's remains layer forming.

The workflow for combined embossed hologram originating is shown on Fig. 9.

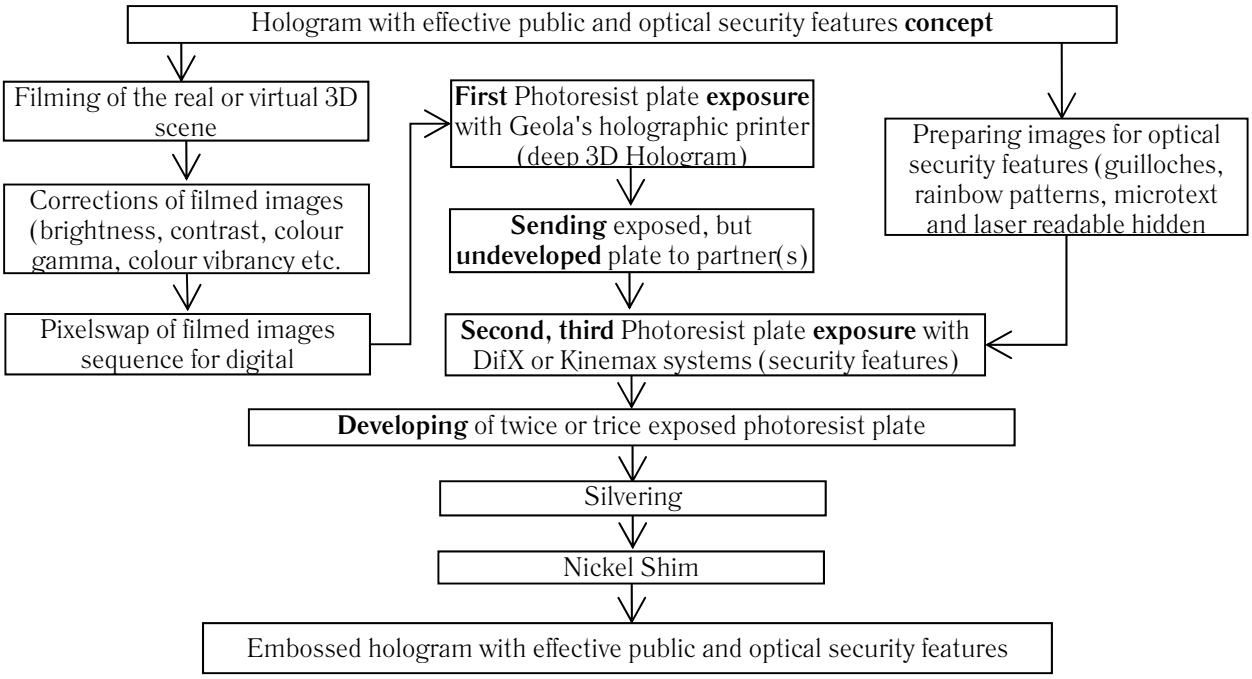
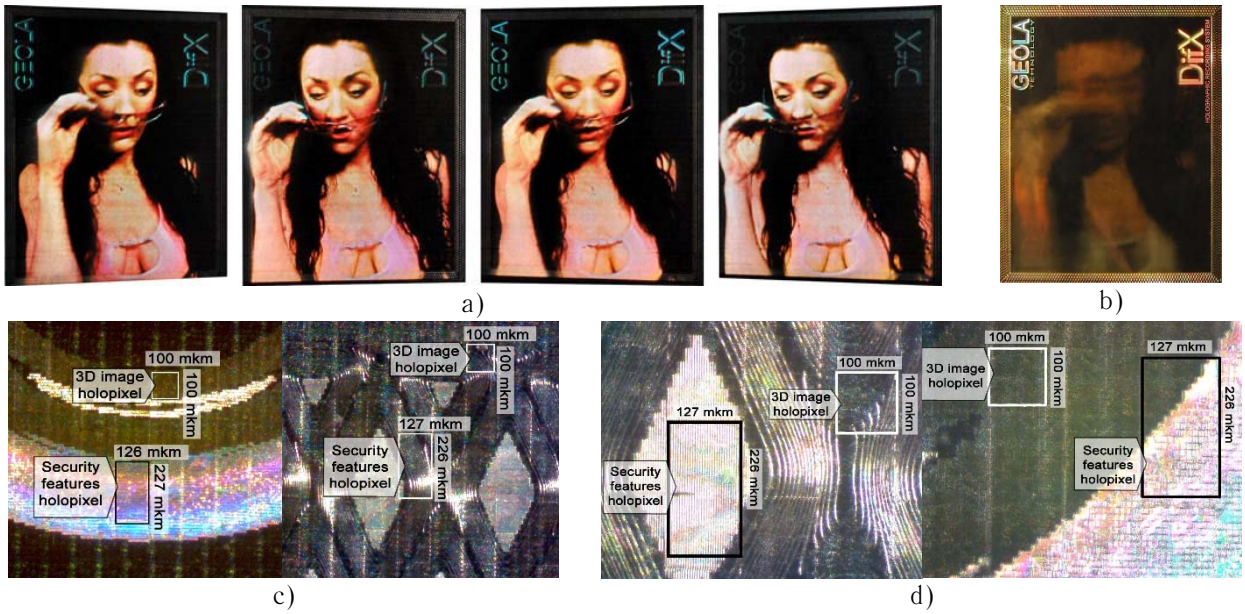


Fig. 9. The workflow for combined embossed hologram originating

Results

First, as a proof of the concept, we have manufactured the hologram in size of 40×50 mm containing the deep 3D image of the real girl and added to it guilloche frame with DifX machine — Fig. 10. Parallax related images of the girl were taken with Geola's HoloCam parallax-related images capturing device. Corrections of filmed images took us two hours, pixelswap — 10 minutes. Imprinting 3D image hologram of the real girl onto photoresist plate took us 2.5 hour. After that,

exposed but not developed photoresist plate was send to DifX, Latvia, where it was again exposed with DifX machine, developed and silvered. Then shim was made and small run of embossed holograms on transparent and metalized foil was manufactured.



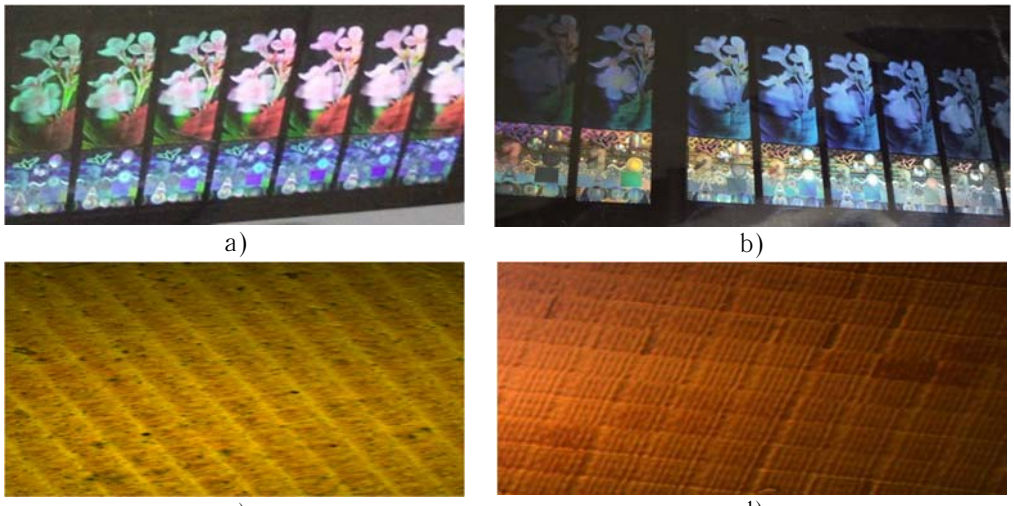
a — photographs of the embossed hologram illuminating it from the direction where deep 3D image would be clearly visible, b — photograph of the embossed hologram illuminating it from the direction where guilloches and embossed inscriptions are clearly visible, c and d — microphotographs of embossed hologram with different magnifications.
Fig. 10. The first combined embossed hologram with public and optical security features

After the concept's viability was proven, we have decided to design and manufacture the embossed hologram for Tax Excise Marks. In order to create a security features, recognizable to the general public without any optical aids, we have decided to put onto the hologram holographic 3D images of generally known flowers with leaves and stems.

The images for deep 3D image hologram were captured at Ignetta Holographics, India by putting the bouquets of said flowers onto rotating table. The digital camera was stationed in front of the bouquets. The bouquet was rotated for 0.1° and series of its digital images was captured. The total angle of rotation was ≈45° and series of ≈450 parallax-related images of each bouquet were captured. After that, the series of images were sent to Geola, Lithuania.

At Geola those images were corrected, pixelswapped and imprinted onto photoresist. Exposed but not developed photoresist plates were then sent to Ignetta Holographics, India, where optical security features were added — Fig. 11.

Resulting embossed holograms are eye catching and has full 3D depth and original color of the depicted flower bouquets. To provide additional protection, Ignetta added several security features inside the flower region like laser readable hidden image and microtext. We believe that combination of all those features with deep and naturally looking 3D image assures very high level of products security. Our ultimate aim is that a security hologram would be easy understandable to the general public and at the same time would contain very high level optical security features assured by employing DifX or Kinemax machines. So the general public would understand that in front of them is really a security hologram and experts would be able to check its security features by machines or examine them with other optical devices.



a) b) c) d)

a — photographs of the embossed hologram illuminating it from the direction where deep 3D image would be clearly visible, b — photograph of the embossed hologram illuminating it from the direction where guilloches and embossed inscriptions are clearly visible, c and d — microphotographs of embossed hologram with different magnifications

Fig. 11. The embossed hologram designed for Excise Marks — contains public and optical security features

Resuming:

- We have produced embossed holograms containing effective public security features: full colour 3D images, guilloches and rainbow patterns.
- Besides effective public security features, our embossed holograms also contained optical security features: microtext and laser readable hidden image.
- Master-original holograms were manufactured by exposing the photoresist plate in different origination machines and developing the plate only after the last exposure.

Conclusions

- Modern photoresist plates can be exposed several times and developed only after the last exposure.
- Each photoresist exposure may add a new security feature.
- Embossed hologram containing deep 3D image as public security feature and optical high-level security features can be manufactured by overexposing photoresist plates, exposed with Geola's holographic printer, by DifX or similar Image-matrix machine(s).

References

[1] Saxby G. Practical Holography — Fourth Edition / G. Saxby, S. Zacharovas // CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2015. — P. 359–363

[2] Yoshikawa H. Development of a compact direct fringe printer for computer-generated holograms / H. Yoshikawa, K. Takei // Practical Holography XVIII: Materials and Applications. SPIE Proc. — 2004. — Vol. 5290. — 114.

[3] Yoshikawa H. Direct fringe printer for computer-generated holograms: improvement of printing speed / H. Yoshikawa, T. Yamaguchi, S. Kajiro // Practical Holography XXVII: Materials and Applications. SPIE Proc. — 2013. — Vol. 8644. — P. 86440X.

[4] A. Bulanovs. Digital holographic recording in amorphous chalcogenide films // Holograms — Recording Materials and Applications. — InTech, 2011.

1.4 Формирование микро- и наноструктур для оптики с использованием нового электронно-литографического принципа

М.А. Брук[1], Е.Н. Жихарев[2], А.Е. Рогожин[2], Д.Р. Стрельцов[3], А.В. Спирин[1]
[1] Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, Москва, Россия
[2] Физико-технологический институт Российской академии наук, Москва, Россия
[3] Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук, Москва, Россия

При формировании микро- и наноструктур для оптических применений часто применяют литографические методы, в том числе электронную литографию (ЭЛ) (см., например, [1]). При этом обычно используют традиционную «мокрую» технологию ЭЛ, которая помимо прочих операций включает в себя в качестве обязательных стадию экспонирования электронным лучом в вакууме при комнатной температуре слоя полимерного резиста на твердом субстрате и последующую невакуумную стадию проявления скрытого изображения, связанную с обработкой образцов большими количествами органических растворителей. Формирование изображения при этом основано на различиях в скорости растворения облученных и необлученных областей резиста. Мокрая технология обладает рядом важных достоинств, среди которых основным повидимому является принципиальная возможность получения изображения с высоким латеральным разрешением (порядка 10 нм при использовании соответствующих литографов и высокоразрешающих резистов, например ПММА, ZEP и др.). Однако у этой технологии применительно к задачам оптики имеются и существенные недостатки. К ним можно отнести: 1) необходимость больших доз экспонирования, обусловливающую сравнительно низкую производительность литографического процесса и его высокую стоимость; 2) сложность получения рельефных структур с хорошо скругленным профилем заданной формы; 3) сравнительно невысокую точность вертикальных (по оси Z) размеров получаемого 3D-изображения [2].

Авторами доклада предложен [3, 4] новый «сухой» метод ЭЛ, в значительной степени лишенный указанных выше недостатков. Метод основан на протекании в полимерном резисте в процессе экспонирования электронным лучом в вакууме при температурах выше температуре стеклования резиста цепной химической реакции деполимеризации, сопровождающейся выделением летучих продуктов (мономера), удаляющихся из резиста. При этом в облучаемой области резиста возникает дополнительный свободный объём и происходит релаксация (усадка) полимера, что и приводит к формированию изображения непосредственно в ходе экспонирования (т.н. «самопрояление» изображения). Метод применим к резистам, способным в указанных выше условиях к эффективной деполимеризации до мономера (ПММА, полиметилстирол, полиметилизопропенилкетон и др.). Ниже этот метод будем называть СЭЛТР — сухое электронно-лучевое травление резиста. Для проведения процесса СЭЛТР можно использовать обычные электронные литографы или сканирующие электронные микроскопы (СЭМ), снабженные некоторыми дополнительными опциями, в частности, приставкой для нагрева образца в процессе экспонирования (и, в некоторых случаях, устройством для улавливания паров мономера). Приближённая схема процесса СЭЛТР представлена ниже.

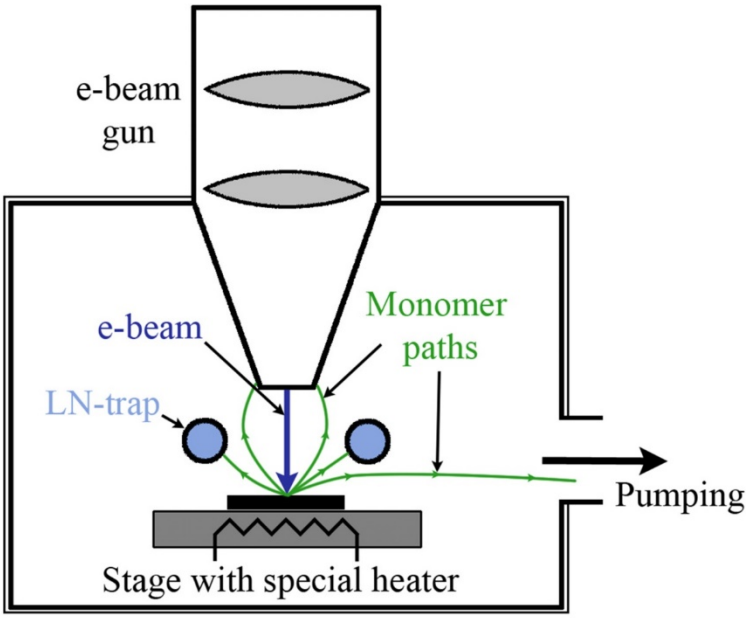


Рис. 1

Метод СЭЛТР позволяет: 1) в сотни раз повысить чувствительность ПММА-резиста в электронно-литографическом процессе по сравнению с «мокрой» технологией ЭЛ; 2) в одностадийном процессе получать рельефы высокого качества с хорошо скругленным профилем заданной формы (асферическим, синусоидальным и т.п.); 3) формировать пространственные 3D-структуры с весьма высоким разрешением по вертикали (порядка 1 нм). Высокая чувствительность резиста в процессе СЭЛТР обусловлена прежде всего цепным характером деполимеризационного механизма травления, в соответствии с которым образование одного активного центра (макрорадикала), требующее расхода энергия излучения, вызывает самопроизвольное отщепление от макрорадикала сотен и тысяч молекул мономера, улетающих в газовую фазу.

К основным недостаткам метода СЭЛТР можно отнести невысокое латеральное разрешение (порядка 100 нм) и сложность получения структур со строго прямоугольным профилем сечения. При решении задач, для которых эти недостатки не являются определяющими, метод по-видимому может представить значительный практический интерес. По нашему мнению он может быть полезен для ряда оптических технологий, в т.ч. и в области голографии. Цель настоящего доклада — показать определенные новые возможности метода СЭЛТР для создания микро- и наноструктур различного профиля.

На рис. 2 представлены характеристические кривые травления ПММА резиста методом СЭЛТР. С учетом того, что доза полного травления слоя ПММА по мокрой технологии порядка 100 мкКул/см^2 (а при формировании 3D структур 300–400 мкКул/см^2) можно видеть очень большие различия в чувствительности ПММА резиста при использовании метода СЭЛТР и мокрой технологии. Доза, необходимая для полного травления слоя резиста методом СЭЛТР при 160°С (см. кривую 1 на рис. 2), в сотни раз меньше, чем для мокрого метода. При неполном травлении слоя резиста, что необходимо в процессе формирования 3D-структур, эти различия ещё значительно больше и могут достигать нескольких тысяч.

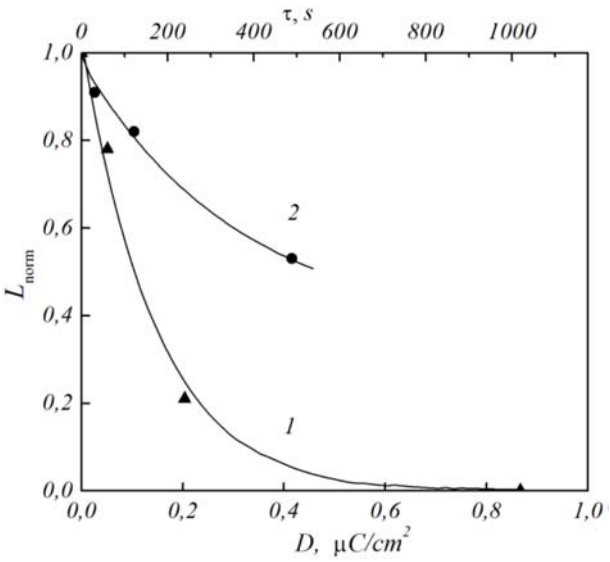
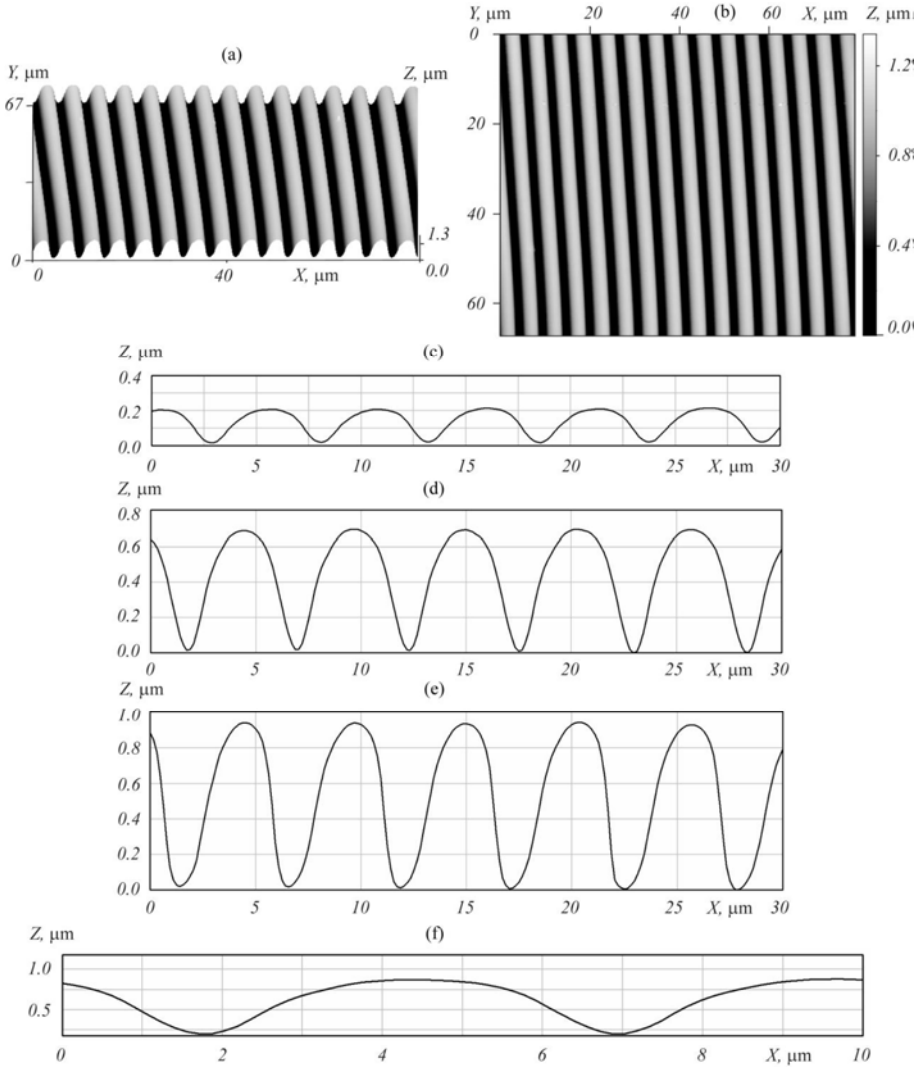


Рис. 2. Нормализованные кривые «толщина слоя — доза» в процессе травления ПММА-резиста методом СЭЛТР. Начальная толщина слоя резиста L_0 = 900 нм (кривая 1) и 340 нм (кривая 2). Экспонирование «в кадр» в СЭМ Camscan при температурах 160°С (кривая 1) и 125°С (кривая 2).

В пленках ПММА-резиста нами были получены скругленные микро- и нанорельефы самого различного профиля, в том числе близкого к синусоидальному и сферическому (асферическому). Глубина и форма получаемых рельефов определяются условиями проведения процесса СЭЛТР (исходной толщиной слоя резиста, дозой и температурой экспонирования, периодом решетки и др.). Изображения некоторых рельефов по данным атомно-силовой микроскопии (АСМ) представлены ниже. Из рис. 3, в частности, хорошо видно, как меняется форма профиля при увеличении глубины рельефа. На рис. 4 представлен рельеф с синусоидальным профилем. Достаточно большая ширина линий на рис. 3 и 4 обусловлена прежде всего большим сечением электронного луча (порядка 200 нм) в использованном нами СЭМ Camscan S4. При использовании СЭМ Ultra-55 с сечением пучка 10–15 нм ширина формирующихся линий значительно меньше (рис. 5). Возможность прямого получения в одностадийном процессе гладких хорошо скругленных рельефов по нашему мнению может представить значительный интерес для ряда применений в оптике и некоторых других областях техники.



a и b — трехмерное изображение и топография рельефа глубиной 900 нм; c, d, e — профили рельефов глубиной 190, 700 и 900 нм, соответственно; дозы экспонирования 0,05, 0,2 и 0,9 мкКул/см^2, соответственно; f — истинный профиль рельефа глубиной 700 нм (при одинаковом по осям X и Z масштабе).

Рис. 3. Изображение рельефов различной глубины и формы, полученных в слое ПММА резиста с начальной толщиной L_0 = 900 нм. Экспонирование «в кадр» в СЭМ Camscan при 160°C

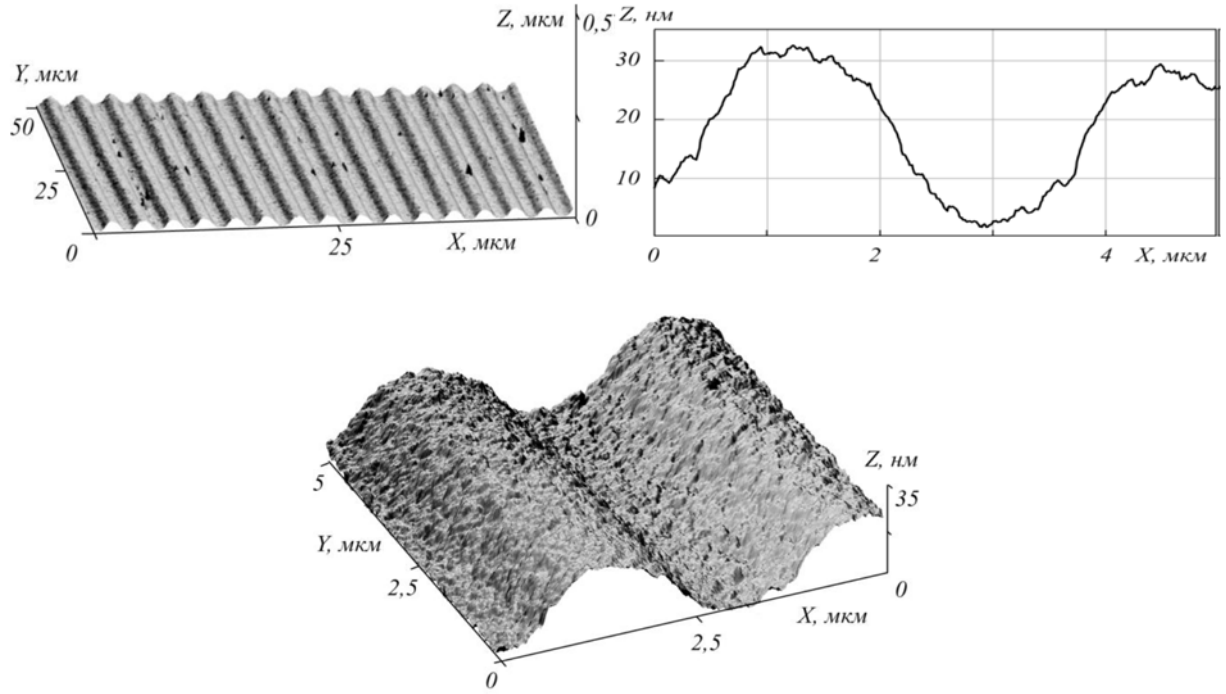


Рис. 4. Решётка в ПММА с синусоидальным профилем сечения. Экспонирование «в кадр» в СЭМ Camscan при 125°C и L_0 = 80 нм.

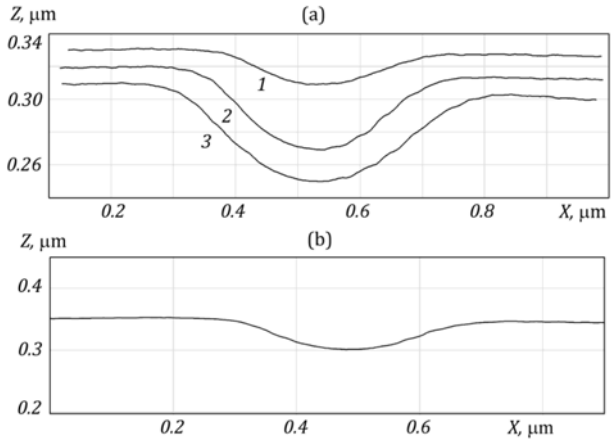
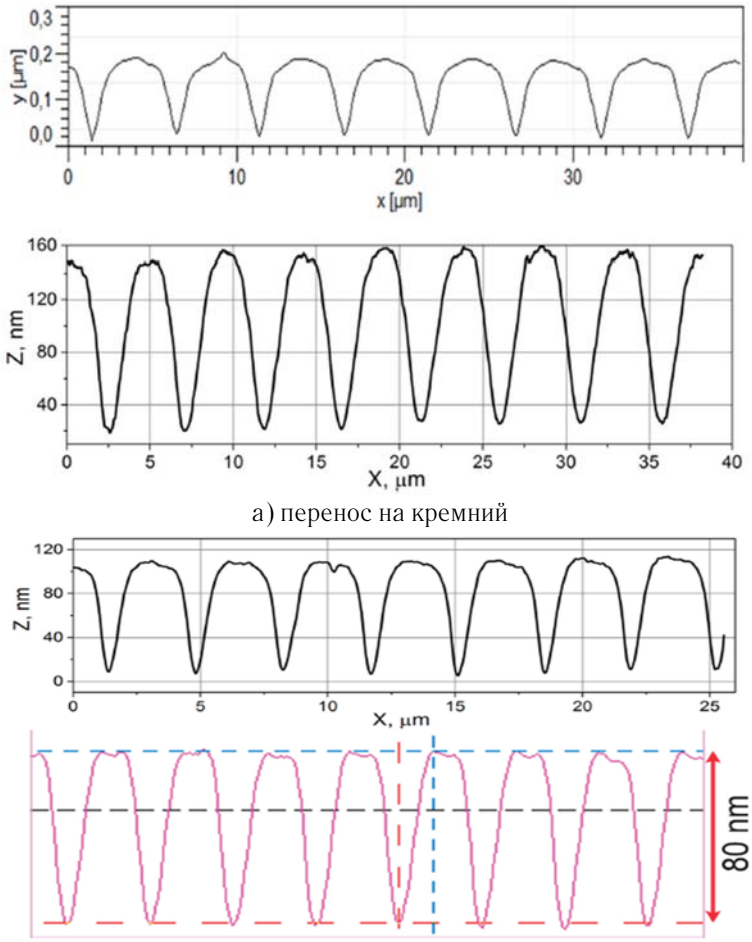


Рис. 5. Профили сечения линий, полученных методом СЭЛТР в СЭМ Ultra-55 при 116°C и L_0 = 80 нм. Внизу — профиль сечения линии 2 в реальном (одинаковом по X и Z) масштабе.

Методом плазменного травления был проведен перенос рельефов, полученных методом СЭЛТР в ПММА, на подложки из кремния и вольфрама (рис. 6).

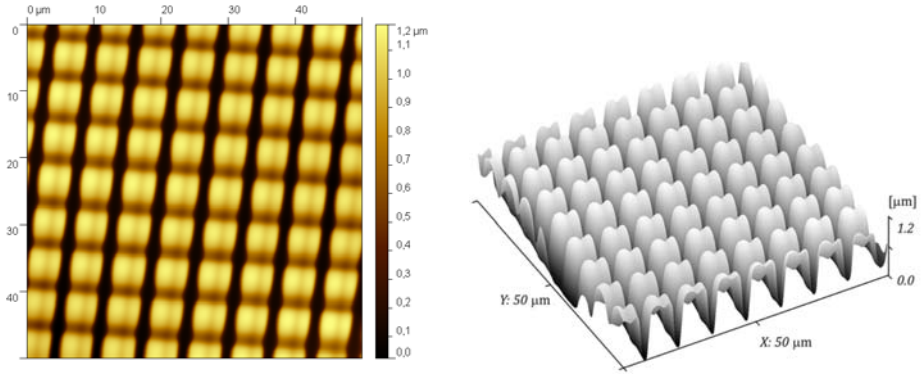


а) перенос на кремний

б) перенос на вольфрам

Рис. 6. Профили сечения рельефов, полученных методом СЭЛТР в ПММА, до (верхние графики) и после (нижние графики) переноса на подложки из кремния и вольфрама методом плазменного травления

Было показано, что методом СЭЛТР могут быть получены достаточно сложные структуры, например, бинарные решетки типа представленной на рис. 7.



а) топография б) 3D изображение

Рис. 7. Микроструктура в виде системы решеток различной глубины, полученная экспонированием в СЭМ Camscan при 160°С слоя ПММА резиста толщиной 1 мкм в двух взаимоперпендикулярных направлениях

Следует подчеркнуть, что метод СЭЛТР весьма удобен также для получения пространственных 3D-структур. На рис. 8 представлено изображение в атомно-силовом микроскопе (АСМ) некоторых 3D-лестничных структур, полученных методом СЭЛТР в СЭМ Ultra-55. Задача получения ступеней одинаковой высоты или ширины в этих эсперименталах не

ставилась. При необходимости могут быть получены структуры со ступеньками высотой 1–2 нм. В некоторых опытах на СЭМ Ultra были получены ступени шириной 0,2 мкм.

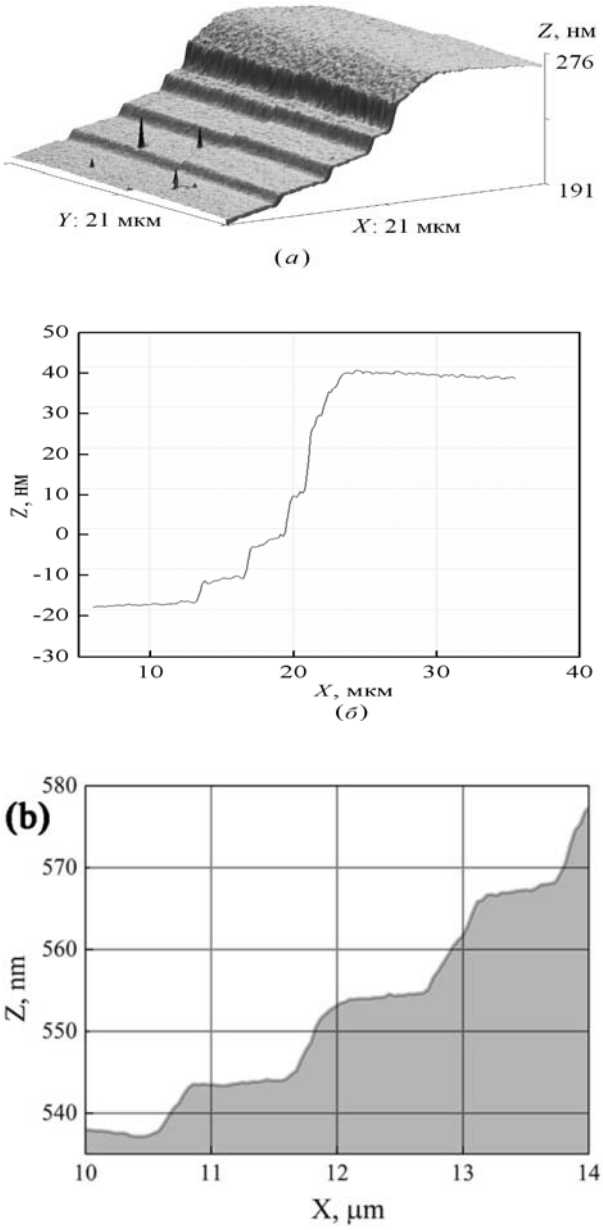


Рис. 8. Некоторые лестничные структуры, полученные методом СЭЛТР в СЭМ Ultra-55

Приведенные в работе данные позволяют заключить, что метод СЭЛТР может быть использован для формирования широкого круга элементов и приборов в т.ч. для оптики и оптоэлектроники (простых и сложных дифракционных решёток, массивов микролинз, соединительных муфт для оптических волноводов, матричных голографических решеток и др.). Проблема состоит в поиске конкретных задач для эффективного использования предлагаемого метода и адаптации электронно-лучевой техники для реализации этих задач.

Источники

[1] Сойфер В.А. Дифракционная нанофотоника / под ред. В.А. Сойфера. — М.: Физматлит, 2011. — 680 с.
[2] Murali R. Metrology for Grayscale Lithography // AIP Conf. Proc. — 2007. — Vol. 931. — P. 419–422.

[3] Патент №2478226 РФ. Способ формирования маскирующего изображения в позитивных электронных резистах / М.А. Брук, Е.Н. Жихарев, В.А. Кальнов, А.В. Спирин, Д.Р. Стрельцов. — 2013, Бюл. №9.
[4] Bruk M.A. The new dry method of mask (relief) formation by direct electron-beam etching of resist / M.A. Bruk, E.N. Zhikharev, D.R. Streltsov, V.A. Kalnov, A.V. Spirin // Microelectronic Engineering. — 2013. — 112. — P. 1–4.
[5] Schleunitz. Combining nanoimprint lithography and a molecular weight selective thermal reflow for the generation of mixed 3D structures / Schleunitz, Ch. Spreu, M. Vogler, H. Atasoy, H. Schift. // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2011. — Vol. 29. — P. 06FC01.

Formation of micro- and nanostructures for optics with using new e-beam lithography principle

M.A. Bruk[1], E.N. Zhikharev[2], A.E. Rogozhin[2], D.R. Streltsov[3], A.V. Spirin[1]
[1] L.Ya. Karpov Institute of Physical Chemistry, Moscow, Russia
[2] Physics and Technology Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[3] Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Method electron-beam lithography are now used for the manufacture various optical elements [1]. The traditional technology of electron-beam lithography is usually used which involves among other operations, exposure by the electron beam in vacuum at a room temperature of polymer resist on a solid substratum, and a subsequent non-vacuum stage of latent image development with using of organic solvents.

We shall further call it a “wet” technology. The main advantage of the wet technology of electron lithography (EL) in applying high-resolution positive resists (polymethylmethacrylate — PMMA, ZEP, etc.) is a possibility to obtain a high-resolution lateral image (approximately 10 nm). Main disadvantages of this method as a process of manufacture of optical elements are as follows: 1) necessity for large exposure doses resulting in relatively lower performance of the lithography process and its high cost; 2) relative complication for obtaining relief structures with a rounded (aspherical, sinusoidal, etc.) given profile cross-section; 3) relatively lower accuracy of vertical sizes (Z-axis) of a resulting 3D-image [2].

The authors of this paper have proposed [3, 4] a new “dry” method of the image formation in some positive resists directly during exposure by the electron beam in vacuum (DEBER — dry electron-beam etching of resist). The method is based on the electron-stimulated chain depolymerization reaction in polymer resist during exposure at temperatures close to a glass transition temperature (or at higher temperatures) with removal of produced volatile products (monomer) from resist directly during exposure. The method may be applied to resists capable under the above conditions to efficient monomer depolymerization (PMMA, poly-a-methylstyrene, polymethyl-isopropenylketone, etc.). The method DEBER enables to increase sensitivity of PMMA resist in electron lithography process compared with the wet technology approximately 100–1000 times. This method is very convenient for obtaining relief micro and nanostructures with a given rounded profile cross-section, which may be used for the manufacture of various kinds of optical elements. The method also permits to form spatial 3D-structures with good accuracy of vertical sizes (approximately 1 nm) and with low surface roughness. The main disadvantages of the DEBER method is lower lateral resolution (approximately 100 nm).

In this paper for PMMA resist as an example it has been shown that DEBER method is convenient for obtaining micro and nanostructures with various rounded profile cross-section (Fig. 1–4). The examples are given to obtain spatial 3D-structures with good accuracy of vertical sizes and with low surface roughness (Fig. 5, 6).

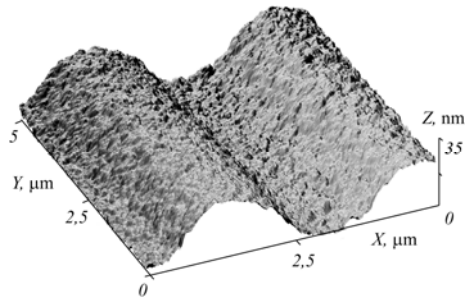


Fig. 1. AFM image of the relief with sinusoidal profile

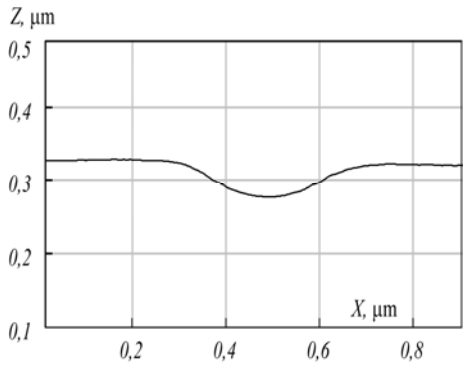


Fig. 2. The true cross-section one of the line

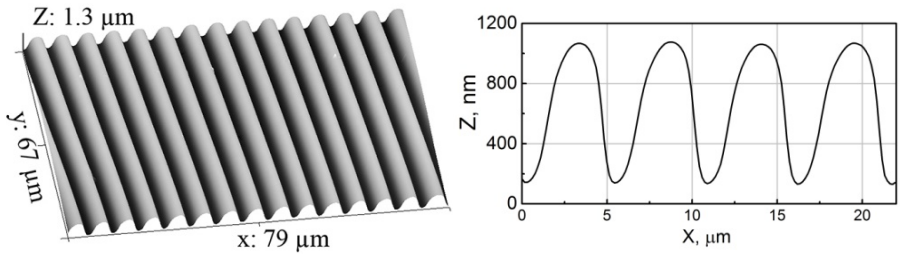


Fig. 3. AFM image of the relief with depth 900 nm

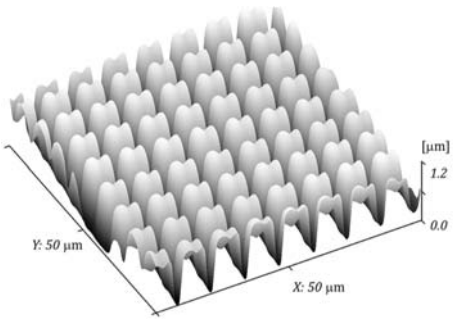


Fig. 4. 3D image of the binary grating

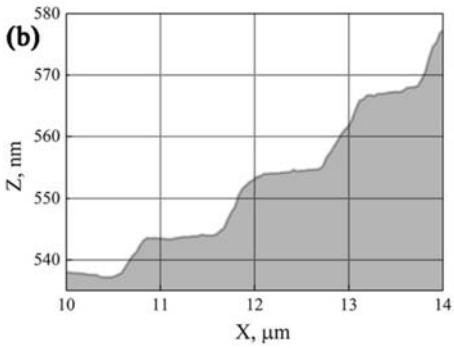


Fig. 5. The cross-section one of the Staircase-like structure

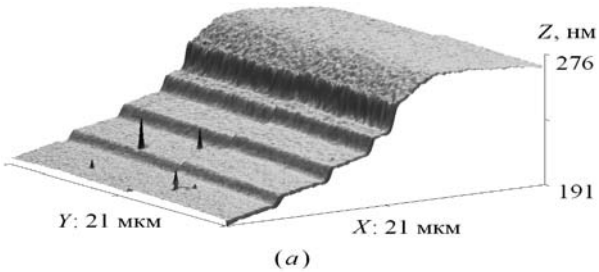


Fig. 6. 3D image one of the staircase-like structure

It could be concluded that the DEBER method has a great potential in some applications. In particular the method could be used for the manufacture of components of optoelectronics systems (diffraction gratings, et al. DOE, microlens arrays, focusators, waveguide couplers, holographic elements etc.).

References

[1] Soifer V.A. Diffracrive Nanophotonics / ed. by V.A. Soifer // CRC Press, Taylor&Francis Group, CISP, Boca Raton, 2014. — 679 p.
[2] Murali R. Metrology for Grayscale Lithography // AIP Conf. Proc. — 2007. — Vol. 931. — P. 419–422.
[3] Patent №2478226 RF. Method of masking pattern formation in positive e-beam resist layers / M.A. Bruk, E.N. Zhikharev, V.A. Kalnov, A.V. Spirin, D.R. Streltsov. — 2013. Bulletin №9.
[4] Bruk M.A. The new dry method of mask (relief) formation by direct electron-beam etching of resist / M.A. Bruk, E.N. Zhikharev, D.R. Streltsov, V.A. Kalnov, A.V. Spirin // Microelectronic Engineering. — 2013. — 112. — P. 1–4.

1.5 Метод контроля качества защитных голограмм на основе косвенного измерения периода и глубины поверхностного микрорельефа

В.В. Колючкин[1], Е.Ю. Злоказов[1], С.Б. Одиноков[1], Н.В. Пирютин[1], В.Е. Талалаев[1], И.К. Цыганов[1], О.И. Воскресенская[2], Н.В. Москвичёв[2]
[1] Московский государственный технический университета им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[2] Научно-исследовательский институт — филиал АО «Гознак», Москва, Россия

Введение

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

- пространственная частота ν_x или период $T = \dfrac{1}{\nu_x}$;
- глубина d фазового рельефа;
- количество N периодов в голопикселе;
- ориентация φ ДР.

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

Альтернативой методу прямых измерений является косвенный метод измерения, когда о параметрах ДР можно судить на основе анализа дифракционного распределения [2]. В настоящей работе приводятся результаты исследований, позволяющие по параметрам дифракционного распределения оценивать параметры поверхностного микрорельефа голографических и дифракционных оптических элементов.

Результаты расчетов

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

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

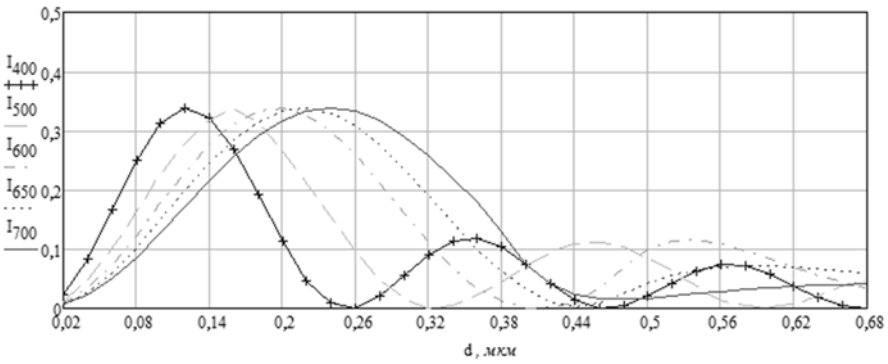


Рис. 1. Распределение интенсивности при $T = 1$ мкм

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

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

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

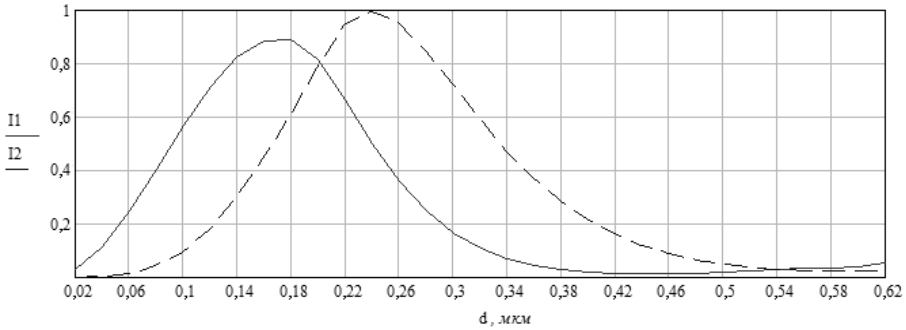


Рис. 2. Распределение интенсивности при $T = 1$ мкм, при угле падения 60°

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

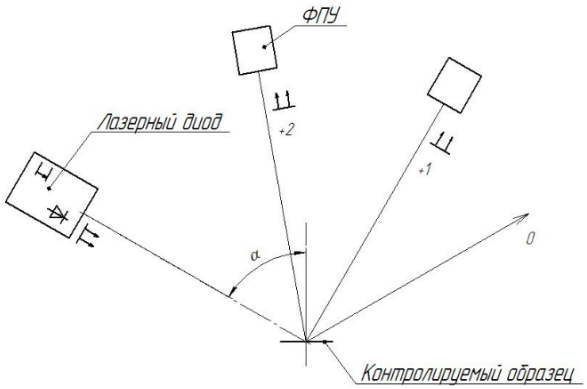
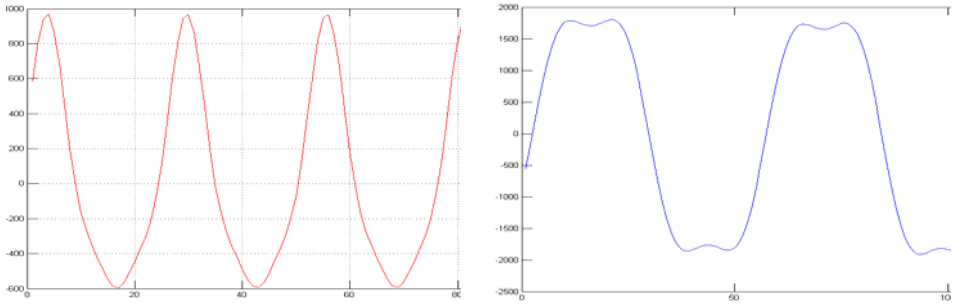


Рис. 3. Функциональная схема устройства

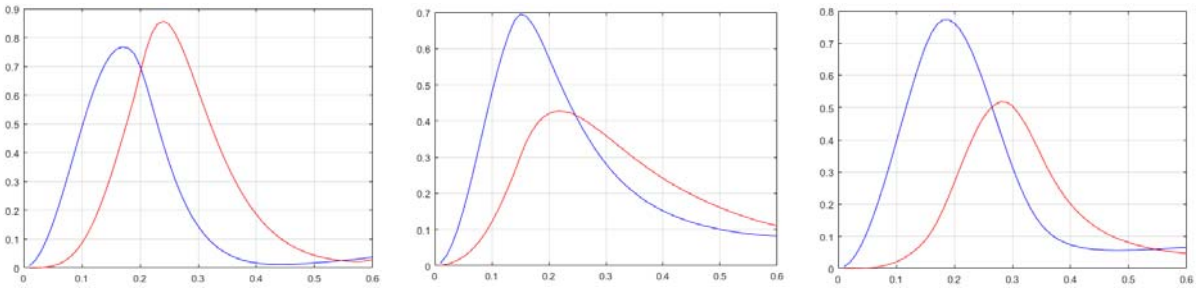
Рассмотрим особенности этого метода для фазовых рельефов, профиль которых отличается от синусоидального. На рис. 4а и 4б представлены типичные варианты профилей фазовых рельефов ДР ЗГ, полученные усреднением профилей реальных ЗГ, зарегистрированных с помощью атомно-силового микроскопа. Первый профиль условно назван «гребенчатым», второй — «трапецеидальным».



а) б)

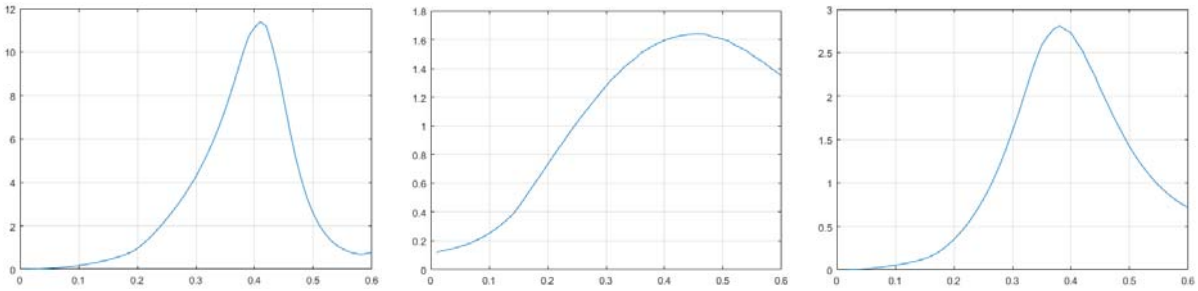
Рис. 4. Примеры «гребенчатого» (а) и «трапецеидального» (б) профилей фазового рельефа ЗГ

На рис. 5 представлены графики зависимости интенсивности в 1-м и 2-м порядках дифракции от глубины для синусоидального (а), гребенчатого (б) и трапецеидального (в) профилей рельефа ДР с периодом 1,0 мкм при подсветке излучением с длиной волны 405 нм под углом 60°. На рис. 6 приведены зависимости отношений интенсивностей 2-го и 1-го порядков от глубины рельефа для трёх соответствующих профилей рельефа.



а) синус б) гребень в) трапеция

Рис. 5. Зависимости интенсивности в 1-м и 2-м порядках дифракции от глубины рельефа



а) синус б) гребень в) трапеция

Рис. 6. Зависимости отношений интенсивностей 2-го и 1-го порядков от глубины рельефа

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

Заключение

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

Источники

[1] Бессемельцев В.П. Контроль качества отражающих голограмм методами конфокальной микроскопии // XI международная конференция Голоэкспо-2014: сборник научных трудов. — 2014. — С. 50–53.

[2] Колючкин В.В. Метод когерентного контроля глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов / В.В. Колючкин, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одиноков, В.Е. Талалаев, И.К. Цыганов // Компьютерная оптика. — 2015. — Том 39. — №2. — С. 515–520.

[3] Хорохоров А.М. Исследование влияния параметров фазовых дифракционных решеток на распределение интенсивности дифрагированного света при формировании цветокодированных изображений / А.М. Хорохоров, А.М. Клищук, И.К. Цыганов, С.Б. Одиноков, А.Ф. Ширанков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. — Сер. Приборостроение. — 2005. — №4. — С. 13–26.

Quality inspection method of security holograms based on indirect measurement period and the depth of the surface microrelief

V.V. Kolyuchkin[1], E.J. Zlokazov1, S.B. Odinokov[1], N.V. Piryutin[1], V.E. Talalaev[1], I.K. Tsyganov[1], O.I. Voskresenskaya[2], N.V. Moskvichev[2]
[1] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[2] Research Institute — branch of JSC “Goznak”, Moscow, Russia

Security holograms are perspective for document and product authenticity protection. The quality of security holograms and master-matrices significantly depends on perfection of diffraction grating. Authors represent the quality inspection method of security hologram based on indirect measurements of diffraction grating parameters. The theoretical results of this method application for quality inspection are shown in this paper.

1.6 Микро-дисплеи для цифровой голографии

И.Н. Компанец, А.Л. Андреев
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Рассматриваются характеристики современных микро-дисплеев на базе жидких кристаллов и электромеханических микро-зеркал, способных в качестве пространственных модуляторов света быстро формировать в оптическом виде большие массивы информации для их записи в виде цифровых голограмм.

Введение

Голографический метод позволяет наблюдать восстанавливаемые из голограммы трехмерные изображения без стереоочков и с непрерывным параллаксом, т.е. с наибольшей реалистичностью.

Для создания оперирующего в реальном времени интерактивного голографического дисплея, восстанавливающего синтезированные компьютером голограммы, наряду с быстрым вычислением цифровой голограммы, требуется быстрое формирование информационного массива — изображения для записи голограммы. Оно осуществляется с помощью электрически управляемых пространственных модуляторов света (ПМС), способных модулировать амплитуду, фазу или поляризацию световых волн в пространстве и на лазерной несущей передавать сформированное изображение в систему записи голограмм или в др. оптические системы хранения и обработки информации [1—3].

Реально в качестве ПМС используются компактные микро-дисплеи, разработанные для отображения информации и управляемые с помощью микро- и интегральных схем. Это полноценные дисплеи со стандартным управлением, привычным быстродействием (60, 90, 120 к/с) и числом элементов экрана (форматом) порядка 1000×1000 и более пикселей. В системе с проекционной оптикой они способны отображать на проекционном экране изображения размером до нескольких квадратных метров и более.

Наиболее распространёнными и важными для пространственной модуляции света являются следующие микро-дисплеи [3—8]:

АМ ЖКД (AMLCD) — пропускающие свет жидкокристаллические дисплеи с активной матрицей управления на тонкоплёночных транзисторах и с нематическим ЖК (НЖК) в качестве электрооптической среды экрана,

- LCoS (ЖКнК) и FLCoS (СЖКнК) — отражающие свет жидкокристаллические дисплеи с активной матрицей управления, встроенной в кремниевую подложку, и с нематическим ЖК или со смектическим сегнетоэлектрическим ЖК (СЖК) в качестве электрооптической среды экрана,

- MEMs/DMD дисплеи — отражающие свет микро электромеханические (МЭМ, по принципу работы) цифровые дисплеи с активной матрицей управления, встроенной в кремниевую подложку, и с матрицей монтируемых на ней отклоняемых микро-зеркал.

Характеристики ПМС

Светопропускающие ЖК ПМС [6, 7]

Все светопропускающие ПМС являются жидкокристаллическими, и в них используется НЖК. Они адресуются с помощью так называемой «активной матрицы» электронных ключей на базе тонкоплёночных транзисторов, обычно располагаемых в углу каждого пикселя. По

этой причине и учитывая наличие контактных шин в межэлектродных промежутках, экраны ПМС имеют недостаточно высокий коэффициент заполнения (порядка 60%).

Наиболее известными и коммерчески доступными являются ПМС компаний HOLOEYE и MEADOWLARK OPTICS, производящих разные варианты светопропускающих приборов для модуляции фазы, амплитуды и поляризации. Например, ПМС типа HOLOEYE LC-2012 формата 1024×768 пикселей с шагом 36 мкм способен с частотой 60 Гц формировать массивы данных с 256 градациями серого (8 бит), обеспечивая чисто фазовый сдвиг до 2π на длине волны 450 нм и 1π на длине 800 нм с контрастным отношением до 1000:1. Фазовый ПМС типа HEX компании MEADOWLARK OPTICS имеет рабочую апертуру в форме диска и 127 пикселей гексагональной формы и в качестве чисто фазовой маски способен осуществлять коррекцию линейно поляризованного волнового фронта, прошедшего через аберрационную среду.

ЖК ПМС на основе структуры LCoS [3, 4, 6–9]

Адресация элементов микро-дисплея осуществляется с помощью электронных ключей, формируемых в кремниевой пластине по КМОП-технологии. В верхнем уровне металлизации на кремнии создаётся матричная система алюминиевых зеркал, выполняющих роль управляющих электродов ЖК-электрооптической ячейки и в то же время отражающих падающий на ячейку свет. С помощью шлейфа структура соединяется с управляющим контроллером, формирующим исходные для отображения электронные данные. Цветные изображения формируют обычно по схеме с тремя микро-дисплеями LCoS в оптических RGB-каналах.

Технология отличается простотой (используются стандартные процессы микроэлектронного производства), чрезвычайно малым размером пикселей (порядка 3–5 мкм), высоким фактором заполнения (около 93% при шаге пикселей 4 мкм и промежутке 0,2 мкм между ними) и низкими затратами на изготовление [3]. Последние достижения в интегральной схемо-технике и в ЖК-материалах позволили японским компаниям JVC и NHK [9] создать CF LCoS микро-дисплей разрешением 8K×4K с шагом пикселя 4,8 мкм и увеличить контрастное отношение до 100K:1. Типичное светопропускание составляет 70–80%, время оптического отклика около 1 мс, температура хранения от –50 до 100 °C, ЖК-интервал от –20 до 80 °C. Отражающая мода и эффективный теплоотвод через кремний позволили достичь плотности светового потока в 2000 лм/см^2.

Наиболее известными и коммерчески доступными являются монохромные ПМС тех же компаний HOLOEYE и MEADOWLARK OPTICS, предлагающих на выбор большой ассортимент изделий. В серии ПМС компании HOLOEYE [6] микро-дисплей GAEA для чисто фазовой модуляции поражает своим форматом 4094×2464 (около 10 мегапикселей), разрешением (133,5 л/мм, шаг пиксела 3,74 мкм) и размером диагонали рабочей матрицы 0,7 дюйма, а также 256 уровнями серого (8 бит). Правда, он работает с темпом 24 к/с, в то время как микро-дисплей форматом 3840×2160 пикселей меняет изображения с темпом 30 к/с. Частоту 60 Гц имеют чисто фазовые ПМС PLUTO и LETO форматом 1920×1080 пикселей (HD) с шагом 8,0 и 6,4 мкм и размером диагонали экрана 0,7 и 0,55 дюйма соответственно. ПМС LC-R-721 для амплитудно-фазовой модуляции отличается повышенным быстродействием (темп 180 Гц), которое обеспечивает закрученная структура НЖК.

Используя НЖК с повышенной скоростью переключения и метод последовательной во времени смены цветов (FSC-метод от Field Sequential Color), реализуемый с помощью трёх поочерёдно включаемых ярких RGB-светодиодов (или лазерных диодов), компания Syndiant (США) создала технологию VueG8-микро-дисплея для пикопроекторов, пригодного и для цифровой голографии [8]. FSC-метод предполагает работу без субпикселей, а значит и цветных RGB-фильтров, и потому обеспечивает менее структурированные (сглаженные) и

вдвое более яркие изображения, а также даёт технологические преимущества, т.к. при том же формате дисплея требуется втрое меньшее число адресуемых пикселей.

Микро-дисплеи и ПМС со структурой FLCoS [10–14]

Микро-дисплеи с сегнетоэлектрическим ЖК отличаются от НЖК-LCoS тем, что СЖК управляются короткими биполярными импульсами напряжения и могут переключаться в десятки раз быстрее, чем НЖК. Это обусловило повышенные требования к технологии. Однако КМОП технология, используя большие объемы межсоединений в компактной упаковке, позволила обеспечить малые размеры пикселей, низкое энергопотребление и высокие скорости смены формируемых в СЖК изображений — вплоть до нескольких тысяч кадров в секунду. Была также решена технологическая задача создания электрооптической СЖК-ячейки с толщиной СЖК всего около 1 мкм, обеспечивающей ахроматизм ячейки.

В микро-дисплеях FLCoS, впервые разработанных в компании DisplayTech, используются СЖК-материалы с бистабильной модуляционной характеристикой, а в разработке микро-дисплея FLCoS в университете Кембриджа — СЖК-материал с непрерывной шкалой серого, разработанный в ФИАН [15]. Поэтому этот материал позволяет формировать цветные изображения с частотой их регенерации 4 кГц. В обоих типах микро-дисплеев в схемах управления учтена необходимость соблюдения нулевого баланса по току (во избежание заполяризации СЖК), но в американском приборе ещё приходится с помощью дополнительных электронных средств формировать полутона (разменивая частоту модуляции на число градаций цвета в битах), из-за чего частота регенерации изображений снижается до 240–360 Гц. Понятно, что оба типа FLCoS-микро-дисплеев обеспечивают скорость переключения свойств, достаточную для формирования проектором цветных изображений по FSC-методу с использованием трёх поочерёдно включаемых монохромных светодиодов разных RGB-цветов.

В компаниях Kopin и Miicron Technologies производится несколько вариантов микро-дисплеев FLCoS формата VGA, WVGA, SVGA и XGA с диагональю рабочей площадки от 0,4 до 0,5 дюйма [12]. Они потребляют менее 100 мВт мощности и формируют изображения с освещённостью до 100 лм. Компанией Forthdd (теперь входит в Kopin) разработаны микродисплеи ещё большего формата [13]: WXGA 1280×768 (с шагом пикселя 13,62 мкм), SXGA 1280×1024 (с шагом пикселя 13,62 мкм) и QXGA 2048×1536 (с шагом пикселя 8,2 мкм), причём они могут работать в интервале температур от −10 до +65 °C (температура хранения от −40 до +80 °C). Все они могут быть использованы как ПМС для амплитудно-фазовой модуляции монохроматического света. Кроме того, скоростные (до 4,5 кГц) ПМС QXGA-3DM применялись как бинарные (0 или π) фазовые модуляторы когерентного света, обеспечивая в первом порядке дифракции эффективность 10% на длине волны 544 нм [14].

DMD-микро-дисплеи [16–19]

DMD-микро-дисплеи, изготовляемые по так называемой технологии DLP (от «Digital Light Processing» — цифровая световая обработка), разработанной в Texas Instruments, относятся к числу наиболее быстрых и ярких. Формирующий изображение экран здесь представляет собой матрицу электрически управляемых микро-зеркал, размещаемую на кремниевой подложке, в которой, как и в LCoS, формируется управляющая электроника.

Однако, принцип формирования изображения не электрооптический, а электромеханический. При подаче электрического сигнала на электроды микро-зеркальной ячейки тонкое и легкое зеркальце размером порядка 10×10 мкм, закрепленное на шарнире, за счёт электростатической силы за время порядка десятка микросекунд отклоняется точно на один угол (например, 20°) в ту или иную сторону относительно шарнира. Отраженный от зеркал световой пучок попадает или не попадает в выходное окошко (рис. 6), отчего оптический

контраст достигает 10 000:1. Не попавший в окошко свет поглощается в материале, обеспечивающем также надежный отвод тепла.

Серая шкала в изображениях организуется за счет повторения отклонений микрозеркальца с разной частотой. Поскольку скорость оптического переключения, задаваемая временем отклонения зеркальца, достаточно высока, цветное изображение создают по FSC-методу, используя источник белого света и вращающийся диск с цветными светофильтрами на пути светового потока к DMD-матрице или три поочерёдно включаемых RGB-светодиода (могут располагаться тоже на диске).

В настоящее время многие электронные компании используют технологию DLP, разработанную в Texas Instruments, для производства видеопроекторов самого широкого назначения: миниатюрные нашлемные и без экранные дисплеи, ПМС, смартфоны, пикопроекторы, аудиторные и кинотеатральные видеопроекторы [18]. Формат проекторов изменяется от VGA (640×480) до HDTV (1920×1080) и WQXGA (2560×1600), а светосила — от 20–50 до 4000 лм.

Texas Instruments продолжает производить и совершенствовать ключевой элемент этих приборов — матрицу DMD [19]. Одна из последних разработок матрицы — чип DLP4500 имеет разрешение 1280×768 пикселей, шаг 7,6 мкм, частоту смены кадров 120 Гц для 8-битовых данных и 4225 Гц для бинарных; она адресуется со скоростью 4,4 Гб/с и потребляет 407 мВт. Новейший чип DLP4710 имеет разрешение 1920×1080 (HDTV), шаг 5,4 мкм и размер по диагонали около 12 мм, а микро-зеркала отклоняются на $\pm 17^{\circ}$. В систему дисплея кроме этого чипа входят контроллер DLPC3439 и драйверы DLPA3000/DLPA3005 PMIC/LED. Параметры последних разработок DMD-матриц говорят, что в DLP-приборах удалось преодолеть проблему уменьшения размера пикселя (в течение многих лет шаг матрицы составлял 17 мкм). Соответственно возросла скорость отклонения зеркал и частота смены кадров: для бинарных изображений эта частота уже приближается к 8 кГц.

Сравнение микро-дисплеев

Сравнение проведём с помощью таблицы, которая качественно отображает характеристики рассмотренных выше микро-дисплеев, причём конкретная характеристика лучше для того микро-дисплея, у которого больше плюсов (по аналогии с [4]).

Табл. 1

Тип микро-дисплея Характеристики	**AMLCD (CF)**	**LCoS (CF)**	**LCoS (FSC)**	**FLCoS (BR)**	**FLCoS (GS)**	**DMD (FSC)**
Скорость оптического переключения	+	+	++	++	+++	+++
Яркость	++	++	+++	+++	+++	++++
Поляризованный свет	+	+	+	+	+	+++
Тип модуляции (А-ампл., Ф-фазовая)	А, Ф	А, Ф	А, Ф	А, А-Ф	А, А-Ф	А, Ф
Сложность электроники	+++	+++	+++	++	++	+
Сложность оптики	++++	+++	++++	++	+++	+
Формат (разрешение)	HD	HD	HD	HD	SVGA	HD
Режим управления (А-аналог., D-цифр.)	A	A, D	A, D	D	A, D	D
Требования по температуре	++	++	++	+	+	++++
Срок службы	++++	++++	++++	++++	++++	+++
Зрелость технологии	+++	+++	++	+++	++	+++

Здесь CF — микро-дисплей с цветными фильтрами; FSC — без цветных фильтров (с последовательной во времени сменой цветов); BR — с СЖК, обладающим бинарным

оптическим откликом; GS — микро-дисплей, разрабатываемый с использованием СЖК, обладающего серой шкалой, HD — формат высокой чёткости.

Основные свойства и достоинства/недостатки указанных выше микро-дисплеев из таблицы достаточно ясны. Наибольшим быстродействием обладают приборы на основе структуры FLCoS (GS) и матрицы DMD. Они же наиболее яркие, особенно DMD, к тому же для амплитудной модуляции излучения в матрице DMD не важна поляризация входного светового луча. Амплитудная модуляция с наибольшим оптическим контрастом реализуется в DMD, но с помощью достаточно сложных электронных и оптических ухищрений. Чисто фазовая модуляция света наиболее легко осуществляется в приборах на основе нематических ЖК, которые, однако являются достаточно медленными (обычное быстродействие — 60 Гц). Формат высокой чёткости достигнут и превышен практически во всех типах микро-дисплеев.

Микро-дисплеи на основе структуры LCoS имеют широкий диапазон режимов работы НЖК и могут пространственно модулировать свет в интервале от УФ до дальнего ИК, действуя как активный динамический оптический элемент. Инновации в конструкции LCoS и в оптической схеме считывания позволили сократить потребление энергии, сделать микро-дисплеи портативными, более комфортными для просмотра и более удобными для использования. Этим же принципам следуют микро-дисплеи со структурой FLCoS, привнесшие способность работать без цветных фильтров с на порядок большей скоростью, но не позволяющие пока (хотя предпосылки имеются) осуществлять чисто фазовую модуляцию светового потока.

По большинству характеристик лучшие позиции имеет технология DLP (DMD), но она же самая сложная и потому дорогостоящая: DMD-матрица размещается на дорогом керамическом корпусе, в то время как структуре LCoS требуется всего 2 слоя дешёвой печатной платы [8]; в DMD содержится громадное количество движущихся элементов, требующих сложной настройки; имеется почти втрое большее, чем в LCoS число контактов и шин; имеет место более сложное оптическое тестирование элементов вместо электрического, а также более сложная и громоздкая оптика считывания изображений. Кроме того, не известно, до конца ли решена старая проблема залипания микро-зеркал, характерная для деталей малых размеров (размеры пикселя уже близки к достигнутым в LCoS). Практика скоро покажет, насколько высокая цена прибора соответствует его высоким параметрам и высокой надёжности.

Заключение

Чтобы демонстрировать голографические 3D-изображения в режиме реального времени, необходимо формировать изображения с помощью ПМС с очень высокой скоростью, порядка 10^{11} пикс./с [20]. В настоящее время ни один микро-дисплей этого сделать не может. Поэтому остаётся актуальным продолжение разработки микро-дисплеев и ПМС, обладающих не менее, чем в 10 раз большей производительностью по отношению к достигнутой в настоящее время. В перспективе к достижению этой цели наиболее близок микро-дисплей типа FLCoS с СЖК, обладающим серой шкалой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор RFMEFI61615X0060.

Источники

[1] Васильев А.А. Пространственные модуляторы света / А.А. Васильев, Д. Касасент, И.Н. Компанец, А.В. Парфёнов. — М.: Радио и связь, 1985. — 320 с.

[2] Евтихиев Н.Н. Информационная оптика: учебное пособие для вузов / Н.Н. Евтихиев, О.А. Евтихиева, И.Н. Компанец, А.Е. Краснов, Ю.Н. Кульчин, С.Б. Одиноков, Б.С. Ринкявичус. — М.: Изд-во МЭИ, 2000. — 612 с.

[3] Bleha W.P. Advances in Liquid Crystal on Silicon (LCOS) Spatial Light Modulator Technology / W.P. Bleha, L.-J.A. Lei. // Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VII. — 2013. — Vol. 8736. — P. 0A-1.
[4] Underwood I. A review of microdisplay technologies // Proc. of the annual conference of UK & Ireland SID Chapter. — 2010.
[5] Технология DLP / URL: http://www.ixbt.com/digimage/dlp.html.
[6] URL: http://holoeye.com/spatial-light-modulators/.
[7] URL: http://www.meadowlark.com/spatial_light_modulators.php.
[8] K. Guttag. Syndiant's Competitive Advantages.
[9] URL: http://www.syndiant.com/tech_advantages.html.
[10] M. Sugawara, et al. Super hi-vision at the London 2012 Olympics. // SMPTE Mot. Imag. J. — 2013. —Vol. 122. — 29.
[11] B.F. Spenner. FLCOS hi-res microdisplays, faster than LCD, for video and holographic memory applications / URL: http://www.embedded.com/design/prototyping-and-development/4013117/FLCOS-hi-res-microdisplays-faster-than-LCD-for-video-and-holographic-memory-applications.
[12] Darmon D. LED-Illuminated Pico Projector Architectures / D. Darmon, J.R. McNeil, M.A. Handschy // SID 2008 Technical Digest. — 2008. — Vol. 39. — P. 1070–1073.
[13] Андреев А.Л. Применения сегнетоэлектрических жидких кристаллов — реальные и возможные (обзор) / А.Л. Андреев, И.Н. Компанец // Жидкие кристаллы и их практическое использование. — 2015. — Том 15. — №3. — С. 28–40.
[14] URL: http://www.forthdd.com/products/spatial-light-modulators/.
[15] URL: http://www.forthdd.com/technology/phase-modulation/; http://www.forthdd.com/wp-content/uploads/2016/04/ForthDD-Binary-Phase-Mode-Webtutorial.pdf.
[16] Andreev A.L. Optical response of helix-free FLC: continuous gray scale, fastest response, and lowest control voltage / A.L. Andreev, T.B. Andreeva, I.N. Kompanets, N.V. Zalyapin // J. of the Society for Information Display. — 2014. — Vol. 22. — №2. — P. 115–121.
[17] URL: http://www.ti.com/lsds/ti/analog/dlp/how-dlp-works.page.
[18] URL: http://www.ixbt.com/digimage/dlp.html.
[19] URL: http://www.kns.ru/dlp-proektori/catalog.html.
[20] URL: http://www.ti.com/lsds/ti/dlp/advanced-light-control/pattern-rate-less-8khz-nirscan.page.
[21] Chen J.-S. Realization of real-time interactive 3D image holographic display (Invited) / J.-S. Chen, D. Chu // Applied Optics. — 2016. — Vol. 55. — №3. — P. 127–134.

Micro-displays for digital holography

I.N. Kompanets, A.L. Andreev
P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

To create the interactive holographic display that in real-time reconstructs the holograms synthesized by a computer, together with rapid calculation of digital holograms we need the rapid formation of data blocks — images for recording in the holograms. This task is fulfilled by means of electrically controlled spatial light modulators (SLM) that are capable to modulate the amplitude, phase or polarization of the light waves in a space and to transmit the generated image in a laser beam to the system of hologram recording.

In a practice, the compact micro-displays developed for information displaying and controlled by means of micro- and integrated circuits are used as the SLMs. Among them the following micro-displays are the most important for the application [1–6]:

- AM LCD (AMLCD) — light transmissive liquid crystal displays with the active control matrix of thin-film-transistors and the nematic liquid crystal (NLC) as the electro-optical medium of a display screen,

- LCoS and FLCOS — reflective liquid crystal displays with the active matrix embedded in a silicon substrate , and with a nematic liquid crystal or smectic ferroelectric liquid-crystal (FLC) as the electro-optical medium of a display screen,

- MEMs /DMD displays — reflective micro-electromechanical (on the work principle) digital displays with the active matrix embedded in a silicon substrate, and the matrix of deflectable micro- mirrors mounted on this substrate.

The characteristics of micro-displays considered above are demonstrated qualitatively and with a comparison in the table, from which the specific characteristics are better in a micro-display, which has more pluses.

Table 1

Type of a micro-display Characteristics	**AMLCD (CF)**	**LCoS (CF)**	**LCoS (FSC)**	**FLCoS (BR)**	**FLCoS (GS)**	**DMD (FSC)**
Speed of optical switching	+	+	++	++	+++	+++
Brightness	++	++	+++	+++	+++	++++
Polarized light	+	+	+	+	+	+++
Type of modulation (A-ampl., P-phase)	A, P	A, P	A, P	A, A-P	A, A-P	A, P
Electronic complexity	+++	+++	+++	++	++	+
Optical complexity	++++	+++	++++	++	+++	+
Format (Resolution)	HD	HD	HD	HD	SVGA	HD
Control regime (A-analog, D-digital)	A	A, D	A, D	D	A, D	D
Temperature requirements	++	++	++	+	+	++++
Life time	++++	++++	++++	++++	++++	+++
Technology maturity	+++	+++	++	+++	++	+++

Here CF — micro-display with color filters; FSC — without color filters (with field sequential colors); BR — with FLC possessing the binary optical response; GS — micro-display, developed with the use of FLC possessing the consistent gray scale, HD — High Definition format.

The main characteristics and advantages / disadvantages of the micro-displays indicated above are clear enough from the table. Devices based on the structure FLCoS (GS) and DMD matrix have the highest speed. They are also brighter, especially DMD, and in addition the polarization of the input light beam is not important for the amplitude modulation of the radiation in DMD. Amplitude modulation with a maximum optical contrast is realized in DMD, but due to complicated electronic and optical tricks. Phase only modulation of the light is most easily carried out in devices based on nematic liquid crystals, which however are quite slow (usually the speed — 60 Hz). Format HD is reached and exceeded in almost all types of micro-displays.

Micro-displays based on LCoS structures have a wide range of NLC operating modes and can modulate spatially the light in the range from UV to far IR. Innovations in LCoS design and optical scheme of data read out allowed to reduce energy consumption, to make micro-displays are portable, more comfortable to view and easier to use. Micro-displays with the structure FLCoS follow the same principles. They are capable to operate without color filters with an order greater speed in a bistable mode as well as with the gray scale (the device is under development).

The DLP technology (DMD) has the best positions till now on most of the characteristics but it is the most difficult, and therefore very expensive.

To demonstrate holographic 3D image in real time, it is necessary to form images in SLMs with very high speed, of the order of 10^{11} pixels per second [7]. At present, none of the micro- displays

cannot do this. Therefore, continuation of the development of micro-displays and SLM possessing not less than 10 times better performance (with respect to the achieved nowadays) remains relevant. In the long term to achieve this goal the closest micro displays are such as DMD and FLCoS with gray scale FLC.

References

[1] Bleha W.P. Advances in Liquid Crystal on Silicon (LCOS) Spatial Light Modulator Technology / W.P. Bleha, L.-J. A. Lei // Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VII. — 2013. — Vol. 8736. — P. 0A-1.
[2] Underwood I. A review of microdisplay technologies // Proc. of the annual conference of UK & Ireland SID Chapter (Nov. 21–23, 2010).
[3] Технология DLP / URL: http://www.ixbt.com/digimage/dlp.html.
[4] URL: http://holoeye.com/spatial-light-modulators/.
[5] URL: http://www.meadowlark.com/spatial_light_modulators.php.
[6] K. Guttag. Syndiant's Competitive Advantages.
[7] URL: http://www.syndiant.com/tech_advantages.html.
[8] Jhen-Si Chen, Daping Chu. Realization of real-time interactive 3D image holographic display (Invited) // Applied Optics. — 2016. — Vol. 55. — №3. — P. 127–134.

Устные доклады
Секция №2

Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики

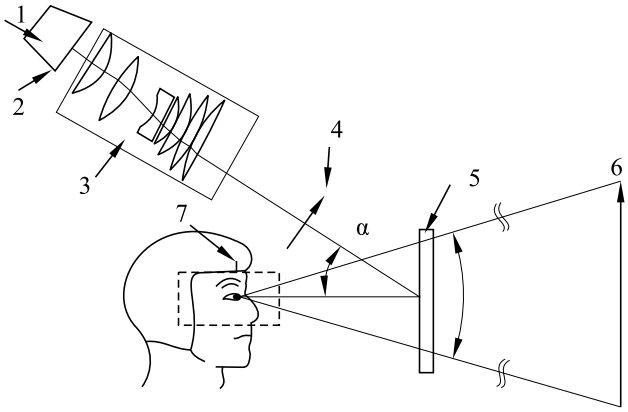
Oral presentations
Section №2

2.1 Голограммный комбинер проекционного дисплея: моделирование и расчет

Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Устройство, получившее название «проекционный дисплей» осуществляет наложение искусственно формируемого изображения, на реальную картину выделенного объема окружающего пространства. Это устройство включает малогабаритный матричный формирователь изображения (микро дисплей) и оптическую систему, которая по своему основному функциональному признаку является окуляром, т.к. отображает на бесконечности несущее информацию изображение, которое накладывается на картину, видимую непосредственно наблюдателем [1]. Сама оптическая система состоит из проекционного объектива и комбинера. Комбинер размещает сформированное проекционным объективом изображение экрана микро дисплея в поле зрения не перекрывая его и обеспечивая возможность наблюдения окружающего пространства (рис. 1).

Начиная с 80-х годов прошлого века в виртуальных дисплеях различного назначения от кабинных и нашлемных до самых миниатюрных очковых [2–5] начали применяться комбинеры на основе объемных голограмм, записанных во встречных пучках по методу Ю.Н. Денисюка.



1 и 2 — микро дисплей и изображение на его экране; 3 — проекционный объектив; 4 — промежуточное реальное изображение; 5 — комбинер; 6 — мнимое изображение экрана микро дисплея; 7 — выходной зрачок оптической системы

Рис. 1. Структурная схема виртуального дисплея

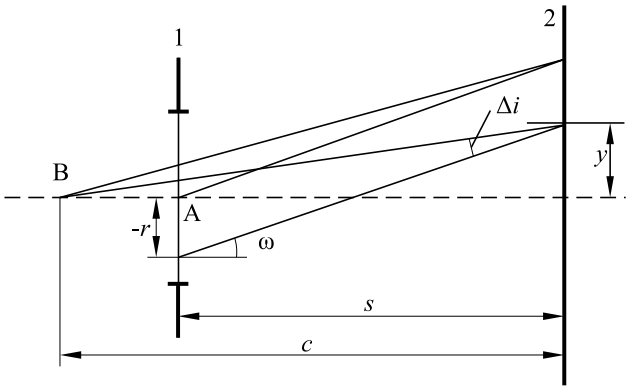
Эти голограммы имеют высокий коэффициент селективного отражения излучения одной длины волны и одновременно достаточное светопропускание всех других длин волн. Это и позволяет накладывать на цветную картина окружающего пространства, монохромное информационное изображение. При этом в отличии от комбинера на основе многослойного диэлектрического зеркала, голограмма-комбинер (ГК) может устанавливаться практически под любым углом к линии наблюдения, в том числе и нормально к ней.

Рассматривая работу оптической системы виртуального дисплея в обратном ходе лучей (рис. 2) легко видеть, что на ГК из зрачка глаза наблюдателя будут падать параллельные пучки лучей в диапазоне углов $-\omega_{max} \le \omega \le \omega_{max}$, зависящем от выбора видимого увеличения системы. Дифракционная эффективность (ДЭ) ГК зависит от степени отступления от условия Вульфа — Брэгга, которое при отсутствии усадки регистрирующего голограмму слоя и при равенстве длин волн записи и восстановления, определяется разностью углов падения на ГК

лучей при записи и восстановлении. Обратившись к рис. 2 легко видеть, что при установке ГК нормально к линии наблюдения, вышеуказанная разность углов описывается соотношением

$$\Delta i = \omega - \mathrm{arctg}\left(\frac{R + s\,\mathrm{tg}(\omega)}{c}\right), \tag{1}$$

где R — радиус выходного зрачка оптической системы (в обратном ходе лучей входного) больший или равный радиусу зрачка глаза, s — расстояние между ГК и зрачком вдоль линии наблюдения, c — расстояние от ГК до точечного источника записи (радиус кривизны фронта записи голограммы).



1 — зрачок глаза наблюдателя; 2 — голограмма; A — центр зрачка; B — центр сферического фронта записи; ω — полевой угол (угол наклона параллельного пучка лучей; Δi — разность углов падения на ГК луча, принадлежащего расходящемуся пучку записи, и луча параллельного пучка

Рис. 2

На рис. 3 представлен один из вариантов нашлемного виртуального дисплея, а в табл. 1 приведены значения разности углов Δi, вычисленные при значения параметров, соответствующих такому дисплею ($R = 5$ мм, $s = 50$ мм). Эта таблица показывает, что если центр сферического фронта записи голограммы совмещен с центром зрачка ($c = s$), то разность углов Δi практически не меняется при изменении полевого угла, а, следовательно, ДЭ голограммы будет одинакова по всему полю зрения.

Рис. 3 Нашлемный виртуальный дисплей фирмы Sarnoff Corporation [6]

Табл. 1. Значения разности углов Δi и соответствующие им высоты в плоскости зрачка r в зависимости от полевого угла ω и расстояния от ГК до точечного источника записи c

c, мм	ω, град	$-R \le r \le R$			
		Δi_{max}, град	$r(\Delta i_{max})$, мм	Δi_{min}, град	$r(\Delta i_{min})$, мм
∞	0	0	−5	0	0
	10	10	−5	10	5
	20	20	−5	20	5
50	0	5,71	−5	0	0
	10	5,64	−5	0	0
	20	5,21	−5	0	0
75	0	3,81	−5	0	0
	10	7,09	−5	0,07	4,5
	20	10,02	−5	2,81	5

Причем, благодаря тому, что разность углов Δi (зависящая в этом случае только от отношения R/s) меньше максимального полевого угла ω_{max} как минимум в 3,5 раза, ($\Delta i_{min} < 6°$) можно рассчитывать на вполне приемлемую ДЭ.

Что касается второго фронта записи голограммы, то из чисто конструктивных соображений он должен быть наклонен по отношению к плоскости голограммы на угол $\alpha \ge 45°$ и, в первом приближении, быть плоским. Действительно только в этом случае и при размещении восстанавливающих точечных источников в фокальной плоскости ГК восстанавливаться будут плоские волны, а соответствующие им лучи будут параллельными. В результате требование независимости ДЭ ГК от полевого угла автоматически приводит к построению оптической системы виртуального дисплея по схеме с промежуточным действительным изображением, лежащим в фокальной плоскости ГК (рис. 1).

К сожалению, из-за несоответствия схемы восстановления схеме записи ГК (запись плоским наклоненным фронтом, а восстановление наклоненным сферическим) возникают монохроматические аберрации и, в частности, весьма значительный астигматизм [7]. Действительно, нетрудно показать, что относительная астигматическая разность между сагиттальным f_S и меридиональным f_T фокусными расстояниями составляет

$$\frac{f_S - f_T}{f_S} = \sin^2 \alpha. \qquad (2)$$

При этом сагиттальное фокусное расстояние равно расстоянию между ГК и зрачком вдоль линии наблюдения, т.е. $f_S = s$ (рис. 2).

Столь значительный астигматизм, несвойственный вращательно-симметричным оптическим системам, в сочетании с осевой комой, пропорциональной $\sin \alpha$, существенно осложняет коррекцию аберраций оптической системы виртуального дисплея в целом. В результате, для достижения приемлемого качества формируемого изображения необходимо использовать одну или несколько эффективных мер из ниже предлагаемых:

- асферизация одного из фронтов записи ГК, например, замена плоского фронта на фронт свободной формы (free form);
- включение в схему оптической системы поворотного зеркала свободной формы;
- наклоны и смещения относительно оптической оси центрированных асферических линз проекционного объектива;
- наклон относительно оптической оси микро дисплея.

Опираясь на известные из литературных и патентных источников схемные решения и учитывая формат микро дисплея, его разрешение и требуемое видимое увеличение оптической системы в целом, выполняют компоновку и габаритный расчет оптической схемы виртуального дисплея. Затем на основе расчета обратного хода лучей осуществляют

оптимизацию и определение конструктивных параметров оптической системы. Для этого может быть использована одна из известных программ оптического проектирования (Zemax, CodeV и т.п.). На этапе оптимизации ГК целесообразно моделировать поверхностью, вносящей в падающий на нее волновой фронт фазовую задержку, описываемую полиномом двух переменных. В частности, в среде Zemax [8] в качестве такой поверхности может быть успешно использована поверхность типа Binaryl. Вносимая ею фазовая задержка описывается полиномом вид

$$\psi(x,y)=\sum_{j=1} A_j E_j(x,y)\,, \tag{3}$$

где A_j — размерные коэффициенты, а $E_j(x, y)$ — координатные сомножители: $E_1 = x$, $E_2 = y$, $E_3 = x^2$, $E_4 = xy$, $E_5 = y^2$, $E_6 = x^3$, $E_7 = x^2y$, $E_8 = xy^2$.

Коэффициент A_1 следует положить равным нулю, а A_2 вычислить по формуле

$$A_2 = 2\pi\sin\alpha/\lambda, \tag{4}$$

где рабочая длина волны виртуального дисплея λ должна быть задана в мм. Остальные коэффициенты A_j при $j \geq 3$ могут использоваться как оптимизационные параметры.

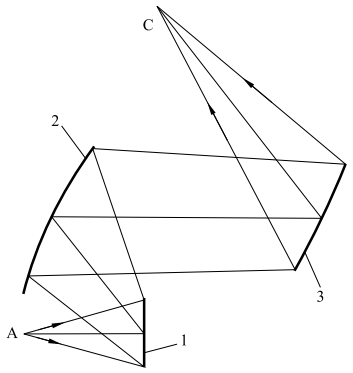
По завершению оптимизации поверхность Binaryl, моделировавшую ГК, следует заменить на поверхность типа Optically Fabricated Hologram, дифракционная бесконечно тонкая микроструктура которой, также как и у реальной голограммы формируется в результате интерференции двух когерентных волн записи. Моделирование фронтов записи осуществляется оптическими схемами, набираемыми в двух специальных файлах. В нашем случае первый фронт записи не требует для своего формирования какой-либо оптической схемы, т.к. представляет собой распространяющийся нормально к плоскости ГК сферический фронт расходящийся из центра зрачка (точка А на рис. 2).

Что же касается оптической схемы формирования второго фронта записи, то для ее поиска следует создать дополнительный Zemax-файл. В нем, найденная в результате оптимизации поверхность Binaryl, должна освещаться первым фронтом записи, а сформированный этой поверхностью асферический и распространяющийся под углом α к оптической оси фронт с помощью дополнительный оптических элементов должен быть превращен в идеально сферический. Как правило, это удается достичь лучевой оптимизацией конструктивных параметров одного или двух зеркал свободной формы. В среде Zemax это поверхность Extended polynomial, описываемая полиномом

$$z(x,y)=\frac{c(x^2+y^2)}{1+\sqrt{1-(1+\kappa)c^2(x^2+y^2)}}+\sum_{j=1} A_j E_j(x,y)\,, \tag{5}$$

где $z(x, y)$ – координата точки поверхности в системе координат, плоскость XOY которой касается вершины этой поверхности; c – кривизна поверхности в её вершине; κ – коническая константа; A_j – коэффициенты асферичности.

На рис. 4 представлена двух зеркальная оптическая схема поиска конструктивных параметров элементов схемы формирования второго фронта записи ГК. Найденные в ходе оптимизации параметры зеркал 2, 3 и обратный ход лучей, исходящих из точки С, заносятся в специальный файл, отведенный под оптическую схему формирования второго фронта записи. В итоге поверхность Optically fabricated Hologram моделирует схему записи ГК, представленную на рис. 5.



A — центр сферического фронта нормально освещающего поверхность Binary1 (1);
2, 3 — зеркала свободной формы; C — действительное изображение точечного источника A.
Рис. 4. Оптическая схема поиска конструктивных параметров элементов схемы формирования второго фронта записи ГК

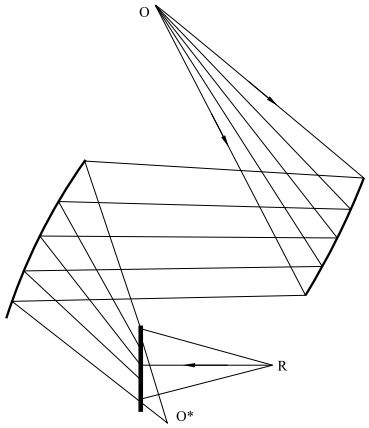


Рис. 5. Оптическая схема записи голограммы Денисюка, моделируемая поверхностью Optically fabricated Hologram в среде Zemax: R и O — центры расходящихся сферических фронтов; O* — условный центр деформированного фронта, формируемого системой двух зеркал свободной формы

Окончательная оптимизация оптической системы виртуального дисплея в целом в среде Zemax может быть осуществлена по всем конструктивным параметрам включая и параметры схемы формирования второго фронта записи ГК.

Таким образом, представленные в настоящем докладе пути и приемы моделирования и расчета ГК виртуального дисплея позволяют с одной стороны обеспечить высокую и независящую от полевого угла ДЭ, а с другой в максимальной степени реализовать преимущества, открывающиеся благодаря замене на ГК комбинера на основе многослойного диэлектрического зеркала.

Оптимизация и поиск конструктивных параметров элементов оптической схемы формирования асферического фронта записи голограммы Денисюка, базирующиеся на лучевом расчете, существенно облегчаются благодаря использованию промежуточной модели в виде бесконечно тонкого *фазозадерживающего* транспаранта. Вносимая им фазовая задержка, геометрия зеркал оптической схемы формирования асферического фронта записи голограммы и собственно модель голограммы Денисюка описываются в настоящем докладе в форме принятой в среде Zemax для поверхностей Binary1, Extended polynomial и Optically Fabricated Hologram, соответственно.

Источники

[1] Бахолдин А.В. Оптические устройства виртуальных дисплеев / А.В. Бахолдин, В.Н. Васильев, В.А. Гримм, Г.Э. Романова, С.А. Смирнов // Оптический журнал. — 2013. — Том 80. — №3. — С. 17–24.
[2] Cakmakci O. Head-Worn Displays: A Review / O. Cakmakci, J. Rolland // Journal of display technology. — 2006. — Vol. 2. — №3. — P. 199–216.
[3] Kress B.C. Diffractive and Holographic Optics as Optical Combiners in Head Mounted Displays / B.C. Kress, M. Shin // UbiComp'13. September 8–12, 2013. Zurich. Switzerland. — P. 1479–1482.
[4] Patent №6,353,503 B1US. Eyeglass display lens system employing off-axis optical design.
[5] Ган М.А. Широкоугольные оптические системы с комбинером на основе синтезированных объемных голограмм для нашлемных дисплеев / М.А. Ган, С.А. Щеглов, Я.М. Ган, А.С. Чертков // Оптический журнал. — 2008. — Том 75. — №3. — С. 18–23.
[6] URL: http://www.fundinguniverse.com/company-histories/sarnoff-corporation-history/.
[7] Patent №4,998,786 US. Method of production holograms particularly for holographic helmet displays.
[8] ZEMAX: software for optical system design / URL: http://www.radiantzemax.com.

The holographic combiner for projection display:modeling and calculation

G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kazin, S.A. Stepanov
Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

The ways and methods of modeling and calculating of the holographic combiner for virtual display are presented. On the one hand, they allow providing high and independent diffraction efficiency of Denisyuk hologram from the angle of field. On the other hand, they allow maximum use of the advantages of holographic combiner compared with multilayer dielectric mirror. It is primarily the fact that, unlike the combiner based on the multi-layered dielectric mirrors, holographic combiner may be installed at virtually any angle to the line of sight, including normal thereto [1].

Optimization and search of the construction parameters of the optical elements of the scheme of formation of the aspherical wavefront for recording of Denisyuk hologram are based on the ray tracing.

These processes are greatly facilitated by the use of an intermediate model in the form of thin transparency for phase delay.

The phase delay of this transparency, the geometry of the optical layout's mirrors for forming the recording aspherical wavefront of the hologram and the actual model of Denisyuk hologram in this article are described in the form adopted in the Zemax environment for surfaces Binary1, Extended polynomial and Optically Fabricated Hologram, respectively [2].

References

[1] Cakmakci O. Rolland J. Head-Worn Displays: A Review // Journal of display technology. — 2006. — Vol. 2. — №3. — P. 199–216.
[2] ZEMAX: software for optical system design / URL: http://www.radiantzemax.com.

2.2 Изменение свойств голографических дифракционных решеток на бихромированном желатине после воздействия коротковолнового УФ излучения

Н.М. Ганжерли[1], С.Н. Гуляев[2], И.А. Маурер[1]
[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Рельефно-фазовые голограммы на галоидосеребряных фотослоях традиционно получают преобразованием первичного серебряного изображения интеференционной структуры в поверхностный рельеф. Одним из эффективных способов такого преобразования является деструктивное воздействие коротковолнового УФ излучения с длиной волны 250–270 нм на желатин (метод ВКУФ) [1], основанное на том, что желатин, как и большинство органических полимеров, хорошо поглощает УФ излучение в коротковолновой области спектра в узком приповерхностном слое. Количество энергии УФ излучения, поглощаемое различными участками желатинового слоя, определяется оптической плотностью первичного серебряного изображения, возникающего в эмульсии вследствие процедуры проявления и фиксирования фотослоя. Первичное серебряное изображение интерференционных полос служит эффективным экраном, модулирующим интенсивность поглощения УФ излучения вдоль поверхности светочувствительного слоя. В результате растворения облученных участков желатина в воде формируется глубокий поверхностный рельеф высотой 1 мкм и более. С помощью данного метода были созданы высокоэффективные случайные и регулярные рельефно-фазовые голографические структуры на галоидосеребряном фотоматериале для голографии ПФГ-01 [2–4].

Кроме галоидосеребряных фотоэмульсий желатин является также основным компонентом слоев бихромированного желатина (БХЖ). Поэтому представляет интерес применить метод ВКУФ и к данной регистрирующей среде. В отличие от галоидосеребряных фотоэмульсий в слоях БХЖ осуществляется непосредственное изменение физико-химических свойств желатина при голографической записи интерференционной картины за счет избирательного светового дубления регистрирующим лазерным излучением в присутствии бихроматов. При этом происходит структурирование, т.е. установление большого количества поперечных связей в максимумах интерференционной картины. Отсюда следует ожидать, что задубленные лазерным излучением участки БХЖ будут 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]. Таким образом, воздействие коротковолнового УФ излучения на слой БХЖ должно приводить к появлению значительного поверхностного рельефа после купания облученных образцов в воде.

Воздействие коротковолнового УФ излучения на толстые слои БХЖ

В качестве объекта исследования нами были выбраны голографические дифракционные решетки, которые регистрировались по симметричной оптической схеме на слоях БХЖ излучением He–Cd лазера с длиной волны 0,44 мкм. Пространственная частота решеток регулировалась в диапазоне от 60 мм$^{-1}$ до 220 мм$^{-1}$ изменением угла схождения интерферирующих пучков.

В эксперименте использовались слои БХЖ, которые изготавливались в лабораторных условиях подобно способу, описанному в работе [6]. 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 от 0,4 г до 1,2 г на 100 мл раствора. После высыхания толщина слоев составляла от 10 мкм до 90 мкм. Экспонированные решетки обрабатывались купанием в 20-ти процентном растворе сульфита натрия Na_2SO_3 в течение 5 мин, далее промывались 20 мин в проточной воде и сушились при комнатной температуре. Обработка слоев ультрафиолетовым излучением проводилась согласно методике, представленной в работе [1], и заключалась в облучении образцов с помощью ртутно-кварцевой лампы ДРТ-220 на расстоянии 5—10 см, промывке в воде в течение 5 мин и сушке при комнатной температуре.

Высота поверхностного рельефа в образцах решеток измерялась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 до и после воздействия УФ изучения. На рис. 1 приведены зависимости высоты поверхностного рельефа h для решеток с пространственной частотой 103 мм$^{-1}$ до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) воздействия УФ излучением от времени экспонирования когерентным лазерным излучением t_{He-Cd}. Концентрация бихромата аммония в слоях составляла 0,6 г на 100 мл раствора. Экспериментальные данные, помеченные кружками, относятся к слою толщиной 51 мкм, а помеченные треугольниками — к слою толщиной 86 мкм. Образцы, необлученные УФ излучением (кривые 1 и 2), показывают незначительный поверхностный рельеф высотой $h \leqslant 0{,}15$ мкм, обусловленный силами поверхностного натяжения, возникающими при сушке мокрого коллоида и другими факторами [7]. После облучения образцов УФ излучением наблюдается значительное увеличение высоты поверхностного рельефа (примерно в 10 раз), приводящее к росту дифракционной эффективности в +1-ом порядке дифракции до величины порядка 25% при считывании излучением He—Ne лазера с длиной волны 0,63 мкм.

Эффект значительного увеличения поверхностного рельефа, связанный с применением метода ВКУФ, имел место и для других образцов решеток на БХЖ в диапазоне пространственных частот от 120 мм$^{-1}$ до 220 мм$^{-1}$ и толщины слоев от 14 мкм до 90 мкм. Для образцов с наибольшей пространственной частотой 220 мм$^{-1}$, для которой еще возможна оценка поверхностного рельефа с помощью микроинтерферометра МИИ-4, высота рельефа после облучения УФ излучением достигла 0,37 мкм, что примерно 4,5 раза больше, чем у необлученных образцов. При этом дифракционная эффективность при считывании излучением He—Cd лазера с длиной волны 0,44 мкм составила 25%. Концентрация бихромата аммония для данных образцов с пространственной частотой решетки 220 мм$^{-1}$ и толщиной 14 мкм была 1,2 г на 100 мл раствора.

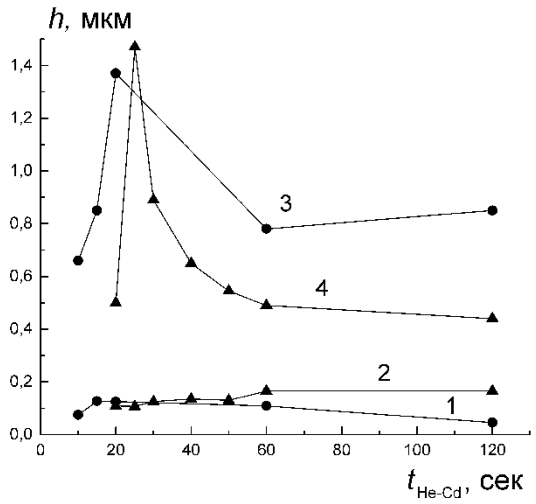


Рис. 1. Зависимость высоты поверхностного рельефа h от времени экспонирования лазерным излучением t_{He-Cd} до (кривые 1 и 2) и после (кривые 3 и 4) УФ облучения голографических решеток

Воздействие коротковолнового УФ излучения на тонкие слои БХЖ

Эффективное поглощение желатином УФ излучения в коротковолновой области спектра с длиной волны 250–270 нм ограничено узким приповерхностным слоем [8]. В работе [5] было показано, что вследствие этого толщина слоя тонких галоидосеребряных фотоэмульсий ($T \leqslant 2$ мкм) будет составлять величину порядка самой высоты поверхностного рельефа. Таким образом, можно предположить, что начальная толщина слоев БХЖ может быть снижена до величины, ненамного превышающей высоту рельефа, которая необходима для получения высокоэффективных дифракционных структур в видимом диапазоне спектра ($h = 0{,}4–0{,}6$ мкм). В связи с этим становится актуальным исследование параметров голографических дифракционных решеток, записанных на слоях, толщина которых приближается к 1 мкм.

С целью получения тонких равномерных слоев БХЖ в лабораторных условиях нами производилось предварительное разбавление первоначального раствора 6-ти процентного желатина с содержанием бихромата аммония 0,4 г на 100 мл раствора в 10 раз. После высыхания толщина слоев в зависимости от количества нанесенного раствора составляла от 1 до 4 мкм. На полученных слоях регистрировались решетки с пространственной частоты 103 мм$^{-1}$. Слои подвергались полной обработке, описанной выше. На экспериментальных образцах решеток по интерферограммам измерялись следующие параметры (рис. 2):

- T_{avr} — средняя толщина слоя БХЖ,
- h — высота поверхностного рельефа как перепад между гребнем и впадиной рельефа,
- h_{min} — расстояние между впадиной рельефа и стеклянной подложкой.

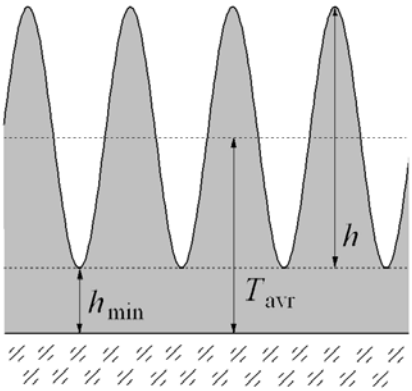


Рис. 2. Измеряемые параметры решетки

На первом этапе исследовались решетки, записанные на слоях БХЖ с начальной толщиной в области решетки $T_{avr} = 3{,}2$ мкм. На рис. 3 и 4 приведены зависимости выше приведенных параметров от времени засветки УФ излучением $t_{УФ}$, измеренных после облучения УФ. Из рис. 3 видно, что средняя толщина слоя в области решетки (черные кружки) монотонно уменьшается с увеличением времени засветки с 3,2 мкм до 1,7 мкм. Вне области решетки (белый кружок) средняя толщина слоя уменьшается до 0,6 мкм, что связано с тем, что данная область при регистрации решеток не была подвергнута световому задубливанию излучением He–Cd лазера.

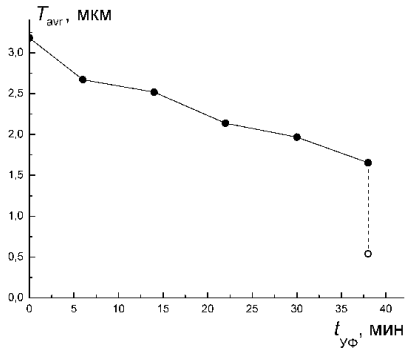


Рис. 3. Зависимость средней толщины слоя БХЖ T_{avr} от времени экспонирования УФ излучением $t_{УФ}$

В отличие от монотонного поведения кривой T_{avr} от $t_{УФ}$, высота поверхностного рельефа h (рис. 4) стремится к насыщению или даже образованию максимума в районе $t_{УФ}$ от 20 до 25 мин для достаточно высокого времен экспонирования лазером ($t_{He-Cd} = 30$ с). Таким образом, с точки зрения получения максимальной высоты поверхностного рельефа увеличение времени засветки УФ более 22–23 минут не целесообразно. Подобное поведение h от $t_{УФ}$ наблюдается и в более ранних исследованиях по воздействию УФ излучения на галоидосеребряные слои. В работе [9] подробно объяснена причина данного характера зависимости h от $t_{УФ}$.

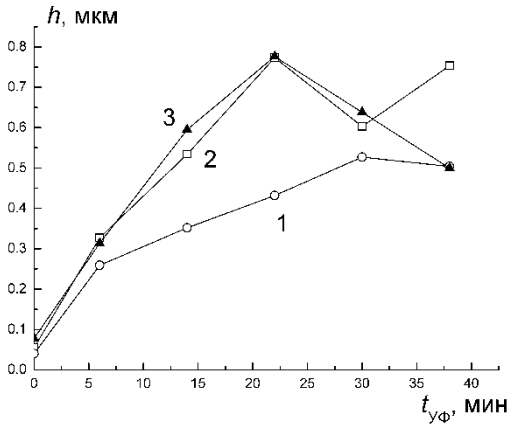


Рис. 4. Зависимость высоты поверхностного рельефа h от времени экспонирования голографических решеток УФ облучением $t_{УФ}$ для разного времени экспонирования когерентным излучением лазера t_{He-Cd}: 1–10 сек., 2–20 сек., 3–30 сек

Более тонкие слои БХЖ были получены нанесением на подложку меньшего количества раствора БХЖ. На них регистрировались решетки с разным временем экспонирования когерентным излучением лазера t_{He-Cd} от 5 сек до 8 минут. После экспонирования и первичной обработки до засветки УФ излучением была измерена толщина слоя рядом с областью решетки с экспозицией 40 сек., которая составила 1,07 мкм. Образцы решеток были подвергнуты засветке УФ излучением в течение 23 мин., после чего купались в воде комнатной температуры 4 мин. и были просушены. Данные для лучших образцов приведены в табл. 1. Видно, что и для более тонких слоев также имеет место десятикратное увеличение высоты поверхностного рельефа. Из рис. 1 и Табл. 1 следует, что оптимальное время экспонирования когерентным светом лазера практически не зависит от толщины слоя БХЖ и составляет 30–40 сек.

Табл. 1

Время экспонирования He–Cd лазером, сек	**Высота рельефа h, мкм**	**Высота рельефа h после УФ облучения, мкм**
30	0,095	0,94
40	0,09	0,85

Поскольку средняя толщина слоя БХЖ в области решетки монотонно убывает с увеличением времени засветки УФ (рис. 4), возникает возможность получить сверхтонкие слои за счет повторного воздействия коротковолнового УФ излучения на желатин. Для этого выше упомянутые образцы решеток вторично облучалась коротковолновым УФ излучением в течение 3, 6, 9, 12 и 15 мин. и купалась в воде. На рис. 5 представлены результаты измерений параметров поверхностного рельефа для решетки с временем экспонирования He–Cd лазером 40 сек. (табл. 1) и начальными параметрами $T_{avr} = 1{,}12$ мкм и $h_{min} = 0{,}45$ мкм. Видно, что при времени засветки УФ излучением более 9 мин. впадины поверхностного рельефа доходят до стеклянной подложки. С другой стороны, высота поверхностного рельефа остается достаточно большой величиной, близкой к величинам длин волн видимого света. Это означает, что полученные сверхтонкие дифракционные структуры должны эффективно рассеивать свет видимого диапазона спектра. Результаты измерения дифракционной эффективности решетки при освещении голограммы пучком He–Ne лазера в +1 и нулевом порядках (не рассеянный свет), приведенные на рис. 6, подтверждают это. Как видно из рисунка, дифракционная

эффективность в +1 порядке достигает 30% при теоретическом максимуме для тонких рельефно-фазовых голограмм в 34%, а величина доли не рассеянного света может упасть до 3%.

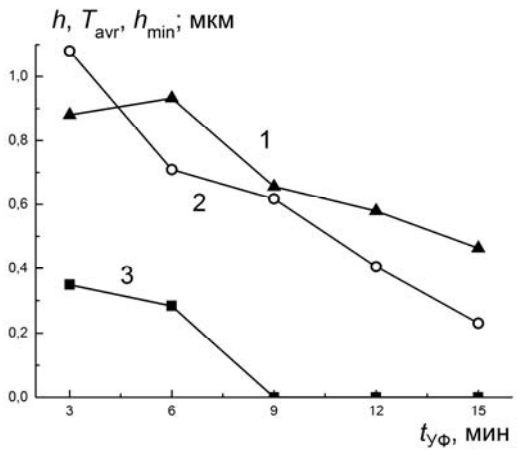


Рис. 5. Зависимость высоты поверхностного рельефа h (кривая 1), средней толщины слоя T_{avr} (кривая 2) и величины h_{min} (кривая 3) от времени повторного облучения голографических решеток УФ излучением $t_{УФ}$

Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что облучение УФ излучением слоев БХЖ с записанными на них голографическими структурами приводит к десятикратному увеличению высоты поверхностного рельефа как для толстых ($T_{avr} > 50$ мкм), так и для тонких ($T_{avr} < 3$ мкм) слоев. Получены сверхтонкие слои со средней толщиной $T_{avr} < 0{,}7$ 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. Использование воздействия коротковолнового УФ излучения позволяет плавно и контролируемо уменьшать толщину зарегистрированных голографических структур. Переход к сверхтонким слоям важен для снижения шумов и аберраций оптических голограммных элементов, созданных на основе БХЖ.

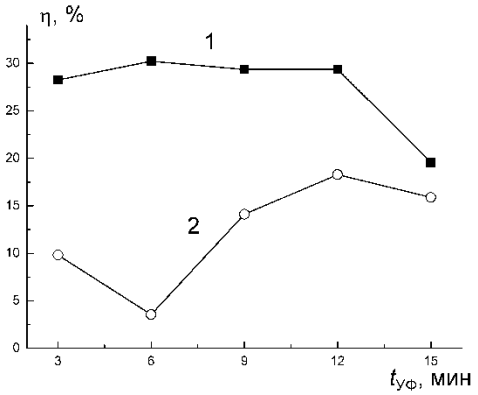


Рис. 6. Дифракционная эффективность η в +1 (кривая 1) и 0 (кривая 2) порядках в зависимости от времени повторного облучения голографических решеток УФ излучением $t_{УФ}$

Источники

[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. канд. дис. СПб.: СПбГПУ, 2006. — С. 10–11.
[6] Shankoff T.A. Phase holograms in dichromated gelatin // Appl. Opt. — 1968. — Vol. 7. — P. 2101–2105.
[7] Smith H.M. Photographic relief images // Journal of the Optical Society of America. — 1968. — Vol. 58. — №4. — P. 533–538.
[8] Козаков О.Н. Поглощение излучения бромсеребряными эмульсионными слоями в ультрафиолетовой области спектра / О.Н. Козаков, С.А. Кулипанов // Журн. научн. и прикл. фотографии. — 1994. — Том 39. — №1. — С. 17–22.
[9] Гуляев С.Н. Формирование поверхностного рельефа голографических структур, полученных при воздействии коротковолнового УФ излучения на фотоэмульсию // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. Основной выпуск. — 2008. — 3(59). — С. 105–114.

Change of properties of holographic diffraction gratings on the dichromate gelatine after shortwave UV radiation

N.M. Ganzherli[1], S.N. Gulyaev[2], I.A. Maurer[1]
[1] Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia
[2] Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Previously, we studied techniques for the transformation of amplitude-phase recording into relief-phase one when recording regular and random processes on silver-halide photographic emulsions [1–3]. The possible formation of a surface relief depth within the order of 1 μm and greater by the action of short-wave UV radiation ($\lambda < 270$ nm, SWUV technique) on the silver-halide photoemulsion gelatin was demonstrated [4]. The SWUV technique is based on the property of gelatin layers to change its width under the UV radiation. The formation of a relief-phase structure relies on the photostimulated destruction of gelatin in a hologram narrow subsurface layer. The quantity of the UV radiation energy absorbed by different regions of a gelatin layer is determined by the optical density of a primary silver image (SI) originating in the emulsion due to the development and fixation procedure. The primary SI of interference fringes serves as an effective screen modulating the intensity of the UV radiation absorption along the photoemulsion layer surface. The resulting high surface relief sets a high diffraction efficiency of structures obtained by the SWUV technique.

Besides silver-halide photoemulsions, gelatin is also the main component of dichromated gelatin layers. Therefore, it is of interest to apply the SWUV technique to this light-sensitive material. Unlike silver-halide photoemulsions, there is a direct change of gelatin physical-chemical properties in dichromated gelatin layers when holographic recording an interference pattern due to selective light hardening by laser radiation in the presence of dichromates. This process is accompanied by structuring, i.e., settling of a great number of transverse links in the interference pattern maxima. Hence we can expect that photolytically hardened dichromated gelatin regions will be less prone to the destructive action of short-wave UV radiation. To support this point, we can refer to a previously obtained result that the volume of the gelatin etched layer under the short-wave UV radiation decreases essentially after the chemical hardening in alum solutions [5]. Consequently, the application of the SWUV technique to the dichromated gelatin layer should lead to the origination of a noticeable surface relief after the dipping of UV irradiated specimens in water solutions.

To verify this assumption, we have selected holographic diffraction gratings as an object of study that were recorded by the He–Cd radiation (of 0.44 μm wavelength) in dichromated gelatin layers with using a symmetric optical arrangement. The spatial frequency of gratings changed within the range from 60 mm^{-1} to 220 mm^{-1} depending on the angle of convergence of interfering beams.

In the experiment, we used the dichromated gelatin layers manufactured under laboratory conditions similarly to the technique described in [6]. This approach permitted changing the thickness of obtained layers and dichromated ammonium concentration. A melted solution of 6% gelatin (into which the dichromated ammonium in the quantity from 0.4 g to 1.2 g per 100 ml of the solution was previously adjusted) was put onto a glass substrate. After drying, the thickness of the layers ranged from 4 mm to 90 mm. The exposed gratings were processed by dipping in the 20% solution of sodium sulfite Na_2SO_3 during 5 min with afterwards washing in flowing water during 20 min and drying at the room temperature. The layers were processed according to the SWUV technique as described in [4] (i.e., the irradiation of specimens by a mercury-vapor lamp DRT-220 at the distance 5–10 cm during 40 min, washing in water during 5 min, and drying at the room temperature).

The height of the surface relief in the grating specimens was measured with a micro interferometer MII-4 before and after the UV radiation. Fig. 1 presents the dependences of the surface relief height h (as a difference between peaks and valleys of the interference pattern) on the exposure time for gratings with the spatial frequency equal to 103 mm^{-1} before (curves 1 and 2) and after (curves 1UV and 2UV) the UV radiation. The dichromated ammonium concentration in the layers was equal to 0.4 g per 100 ml of the solution. The experimental data marked with circles and triangles refer to the layers with the thickness equal to 51 and 86 μm, respectively. The samples that were not exposed to UV radiation (curves 1 and 2) show a small surface relief with the height $h \leqslant 0.15$ μm caused by tensile forces originating when drying a wet colloid [7] and, probably, by a small partial dissipation of regions of nonhardened gelatin in cold water (the temperature of the solutions during the processing was not higher than 20°C). After the UV radiation of specimens, an almost ten-fold increase of the surface relief height is observed, which is shown by the microphotograph of the specimen surface obtained with using a micro interferometer MII-4.

The analysis of interferograms of specimen surfaces indicates the high regularity of the surface relief shape, which evidences the small level of noises and distortions of the surface structure. The considerable increase of the phase modulation depth due to the passage of light beams through the diffraction grating permitted obtaining the diffraction efficiency in the first diffraction order equal to approximately 25% when reading out with the He–Ne laser radiation of the wavelength equal to 0.63 μm.

The tenfold increase of the surface relief height in thinner layers with a thickness of about 1 μm was obtained when recording gratings with a spatial frequency of 103 mm^{-1} after UV radiation. The re-exposure by the UV radiation and conventional processing of grating samples in water allowed obtaining gratings on ultra thin layers of dichromated gelatin, in this case grating depressions reached the glass substrate surface. Fig. 2 shows the dependence of the surface relief height h, the layer average thickness T_{avr} and the value h min on the time t_{UF} of the UV re-exposure of holographic gratings.

The above researches have demonstrated that the UV radiation of holographic structures recorded on both thick (T_{avr} > 50 μm) and thin (T_{avr} < 3 μm) dichromated gelatin layers resulted in the almost tenfold increase of the surface relief height. For the first time, the holographic gratings with the diffraction efficiency near to the theoretical limit have been fabricated on ultra thin dichromated gelatin layers with the average thickness T_{avr} < 0.7 μm that were obtained by means of the UV radiation re-exposure. The use of ultra thin layers will permit one to decrease the noise and aberration of holographic components obtained from them.

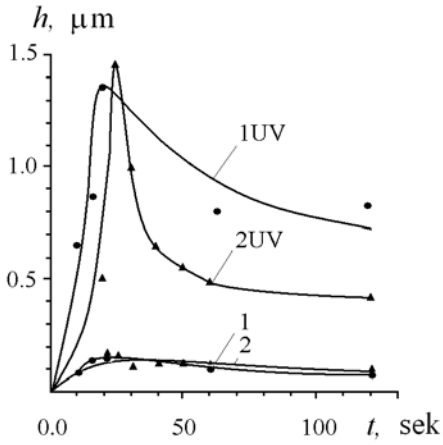


Fig. 1

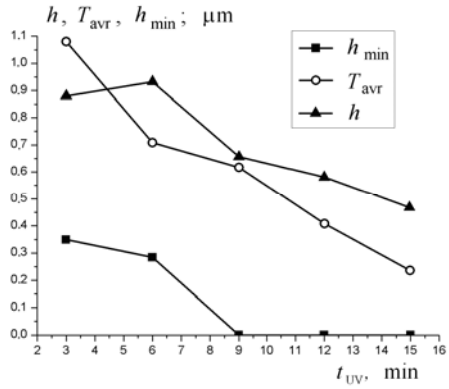


Fig. 2

References

[1] Ganzherli N.M., Gulyaev S.N., Gurin A.S., Kramushchenko D.D., Maurer I.A., Chernykh D.F. // Technical Physics. — 2009. — Vol. 54. — N. 7. — P. 1002–1006.
[2] Ganzherli N.M., Gulyaev S.N., Maurer I.A., Chernykh D.F. // Technical Physics. — 2014. Vol. 59. — №12. — P. 1849–1853.
[3] Ganzherli N.M., Gulyaev S.N., Maurer I.A., Chernykh D.F. // Journal of Optical Technology. — 2015. — Vol. 82. — №3. — P. 37–42.
[4] Gulyaev S.N., Ratushnyi V.P. // Journal of Optical Technology. — 2003. — Vol. 70. — №2. — P. 45–49.
[5] Gulyaev S.N. Ph.D. thesis in Phys.-Math. Sciences. —. St. Petersburg: SPbPU, 2006. — P. 110.
[6] Shankoff T.A. // Appl. Opt. — 1968. — Vol. 7. — P. 2101–2105.
[7] Smith H.M. // Journal of the Optical Society of America. — 1968. — Vol. 58. — №4. — P. 533–538.

2.3 Фазовая демодуляция световых полей в лазерной интерферометрии, основанной на динамических голограммах диффузионного типа в фоточувствительных кристаллах

С.М. Шандаров[1], Н.И. Буримов[1], С.С. Шмаков[1], А.О. Злобин[1], В.И. Быков[1], В.В. Шепелевич[2], А.В. Макаревич[2], К. Щербин[3]

[1] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

[2] Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Мозырь, Беларусь

[3] Институт физики Национальной академии науки, Киев, Украина

Представлены результаты теоретического анализа эффектов фазовой демодуляции в адаптивных голографических интерферометрах, реализуемой при попутном взаимодействии световых волн на динамических голограммах диффузионного типа в кристаллах силленитов среза (110). Показано, что реализация линейного режима фазовой демодуляции возможна за счет совместного вклада в динамический отклик флексоэлектрического и упругооптического эффектов. Экспериментальные исследования голографического интерферометра, использующего попутное взаимодействие в кристалле силиката висмута среза (110) при одинаковой линейной поляризации волн, формирующих голограмму с пространственным периодом 0,6 мкм и с вектором решетки, ориентированным вдоль оси [001], продемонстрировали наличие в спектре выходного сигнала, составляющей, соответствующей линейному режиму демодуляции.

Введение

Преобразование фазовой модуляции когерентных световых полей в модуляцию интенсивности в лазерной интерферометрии, реализуемое при их взаимодействии со стационарным опорным пучком на динамических голограммах в фоторефрактивных кристаллах, характеризуется адаптивностью к медленным вариациям внешних условий и используется в измерительных системах различного назначения [1–5]. Интерферометрические системы данного типа позволяют измерять амплитуды механических колебаний отражающих объектов в динамическом диапазоне от 2 пм до 20 нм [6]; они успешно применялись для прецизионного субнанометрового управления позицией макрообъектов с использованием давления света [7], измерения силы Казимира [8], резонансного взвешивания микрообъектов с точностью в несколько пикограмм [9]. Для увеличения сигнала фазовой демодуляции в голографических интерферометрах, основанных на попутном взаимодействии световых пучков, к фоторефрактивному кристаллу прикладывается внешнее постоянное электрическое поле с напряженностью 10 кВ/см и более [1–4], в котором преобладающим является дрейфовый механизм формирования динамических голограмм. Однако это делает измерительную систему громоздкой, энергоемкой, и непригодной для эксплуатации во взрывоопасных условиях.

Свободными от таких недостатков являются интерферометры, использующие встречное взаимодействие световых пучков на отражательных голограммах, формирующихся за счет диффузионного механизма переноса заряда [2, 4–9]. Для достижения хорошего фоторефрактивного отклика кристалл в этом случае должен иметь значительную концентрацию ловушечных центров, что обеспечивает высокие значения амплитуды поля пространственного заряда голограммы диффузионного типа при ее малом пространственном периоде [1]. Следует также отметить, что в кристаллах с высокой концентрацией ловушек

хорошая эффективность может достигаться и для попутного взаимодействия, при больших углах между сигнальным и опорным пучками, когда пространственный период фоторефрактивной голограммы не превосходит 1 мкм.

При взаимодействии фазово-модулированного сигнального пучка со стационарным опорным пучком на фоторефрактивной голограмме диффузионного типа характер временной зависимости выходного сигнала фазовой демодуляции определяется как поляризационным состоянием взаимодействующих волн [10, 11], так и вкладом в фоторефрактивный отклик различных механизмов, приводящих к возмущениям оптических свойств среды данной голограммой [1, 2, 4–6, 11–13]. В настоящем сообщении основное внимание уделяется анализу влияния характера возмущений оптических свойств фоточувствительной среды, создаваемых полем пространственного заряда динамической голограммы, на амплитуды первой и второй гармоник в выходном сигнале голографического интерферометра, которые соответственно определяют его характеристики для линейного и квадратичного режимов фазовой демодуляции.

Возмущения оптических свойств фоточувствительного кристалла полем пространственного заряда динамической голограммы

Для синусоидальной фазовой модуляции сигнального пучка с частотой $\Omega >> 1/\tau$, где τ — характерное время фотоиндуцированного перераспределения заряда по донорным и ловушечным центрам, формирующуюся в кристалле за счет диффузионного механизма динамическую голограмму можно считать стационарной [11]. Вклад в фазовую составляющую данной голограммы с вектором $\vec{K} = \vec{p}K$, где единичный вектор $\vec{p}$ характеризует направление оси $O\eta$, вдоль которой изменяется интенсивность света в интерференционной картине, формирующей голограмму, определяется следующим распределением напряженности электростатического поля:

$$\vec{E}_1(\eta) = \vec{p}E_1(\eta) = \vec{p}m^{(0)}(\eta)E_{SC}\sin(K\eta), \tag{1}$$

где $m^{(0)}(x)$ — медленно меняющийся вследствие взаимодействия и оптического поглощения контраст стационарной части картины интерференции волн сигнала и накачки, имеющей пространственный период $\Lambda = 2\pi / K$. Эффективное поле пространственного заряда голограммы в рамках одноуровневой зонной модели определяется выражением [1, 11–13]

$$E_{SC} = \frac{E_D}{1 + E_D / E_q}, \tag{2}$$

где $E_D = (k_B T / e)K$ — диффузионное поле, $E_q = eN_A / (\varepsilon K)$ — поле насыщения ловушек, k_B — постоянная Больцмана, T — температура, e — элементарный электрический заряд, N_A — концентрация компенсирующих акцепторных центров и ε — статическая диэлектрическая проницаемость механически свободного кристалла.

Вследствие обратных эффектов, пьезоэлектрического и флексоэлектрического, поле пространственного заряда голограммы сопровождается упругими деформациями со следующими компонентами [14]:

$$S_{kl}(\eta) = \frac{1}{2}(p_l\gamma_{ki} + p_k\gamma_{li})\left[e_i E(\eta) + f_i \frac{dE(\eta)}{d\eta}\right], \tag{3}$$

где γ_{ki} — компоненты тензора, обратного к тензору Кристоффеля с компонентами $\Gamma_{ik} = C^E_{ijkl}p_j p_l$; $e_i = e_{mij}p_m p_j$ и $f_i = f_{ijmr}p_j p_m p_r$ — компоненты пьезоэлектрического и флексоэлектрического векторов, соответственно; C^E_{ijkl}, e_{mij} и f_{ijmr} — компоненты тензоров

модулей упругости электрически закороченного кристалла, его пьезоэлектрических констант и флексоэлектрической связи, соответственно. Таким образом, в возмущения оптических свойств кристалла рассматриваемой динамической голограммой будет вносить вклад как традиционно рассматриваемый линейный электрооптический эффект, связанный с электрическим полем диффузионной голограммы, определяемым соотношением (1), так и упругооптический эффект, вклад которого в соответствие с формулой (3) пропорционален как полю пространственного заряда $E(\eta)$, так и его градиенту $dE(\eta)/d\eta$. Суммарные возмущения компонент тензора диэлектрической непроницаемости кристалла такой голограммой могут быть представлены в виде [14]

$$\Delta b_{mn}(\eta) = \left(r^S_{mnp} p_p + p^E_{mnkl} p_l \gamma_{kl} e_i\right) E(\eta) + p^E_{mnkl} p_l \gamma_{ki} f_i \frac{dE(\eta)}{d\eta}, \quad (4)$$

где r^S_{mnp} и p^E_{mnkl} — компоненты тензоров линейного электрооптического эффекта механически зажатого кристалла и упругооптического тензора электрически закороченного кристалла, соответственно.

Следует отметить, что благодаря совместному вкладу обратного флексоэлектрического и упругооптического эффектов формирование динамических голограмм диффузионного типа является возможным и в центросимметричных фоточувствительных кристаллах (например, в кремнии), где линейный электрооптический эффект отсутствует.

Фазовая демодуляция в кубических фоторефрактивных кристаллах

Взаимодействие сильной стационарной опорной волны со слабой фазово-модулированной гармоническим сигналом с частотой Ω сигнальной волной на фоторефрактивной голограмме приводит к фазовой демодуляции, с временной зависимостью интенсивности сигнальной волны на выходной грани кристалла, которую можно представить в виде суперпозиции гармоник с частотой $n\Omega$ [5, 12–14]:

$$I_S(d,t) \approx I_{S0}\left[M^{(0)}(d) + m^{(1)}(d)\sin\Omega t + M^{(2)}(d)\cos 2\Omega t + \ldots\right], \quad (5)$$

где d — толщина кристалла и $M^{(n)}$ — относительные амплитуды гармоник, которые зависят от ориентации вектора решетки относительно кристаллографических осей и поляризационных параметров взаимодействующих световых волн и определяются как упругими, пьезоэлектрическими и флексоэлектрическими свойствами, так и анизотропией электрооптического и фотоупругого эффектов. Кроме того, в кристаллах силленитов при анализе амплитуд рассматриваемых гармоник должен быть учтен и вклад абсорбционной составляющей голограммы в двухпучковое взаимодействие [12–14].

Фазовая демодуляция при встречной геометрии взаимодействия, позволяющая выделить вклад в нее флексоэлектрического эффекта, была рассмотрена ранее для кристаллов титаната висмута срезов (100) [12, 13, 15], (111) [14, 16, 17], а также для теллурида кадмия среза (111) [14, 16].

Для попутной геометрии в образцах среза (110) наиболее простые соотношения для $M^{(n)}$ имеют место при одинаковой линейной поляризации взаимодействующих волн, формирующих голограмму с вектором решетки, ориентированным вдоль оси [001]. В этом случае с использованием подходов, рассмотренных в работах [11–13, 15, 18], выражения для относительных амплитуд первой и второй гармоник в выходном сигнале фазовой демодуляции могут быть получены в виде

$$M^{(1)}(d,\varphi_m)=4J_0(\varphi_m)\exp\left(-\frac{\Gamma_E+\Gamma_a}{2}d\right)\exp\left[-\frac{\Gamma_E}{\rho}\sin(\rho d)\cos(\rho d+2\phi)\right]\times$$
$$\times\sin\left(\frac{\Gamma_{f1}}{2}d-\frac{\Gamma_{f2}}{2\rho}\sin(\rho d)\cos(\rho d+2\phi)\right), \quad (6)$$

$$M^{(2)}(d,\varphi_m)=4J_0(\varphi_m)J_2(\varphi_m)\left\{\exp\left(-\frac{\Gamma_E+\Gamma_a}{2}d\right)\exp\left[-\frac{\Gamma_E}{\rho}\sin(\rho d)\cos(\rho d+2\phi)\right]\times\right.$$
$$\left.\times\cos\left(\frac{\Gamma_{f1}}{2}d-\frac{\Gamma_{f2}}{2\rho}\sin(\rho d)\cos(\rho d+2\phi)\right)-1\right\}, \quad (7)$$

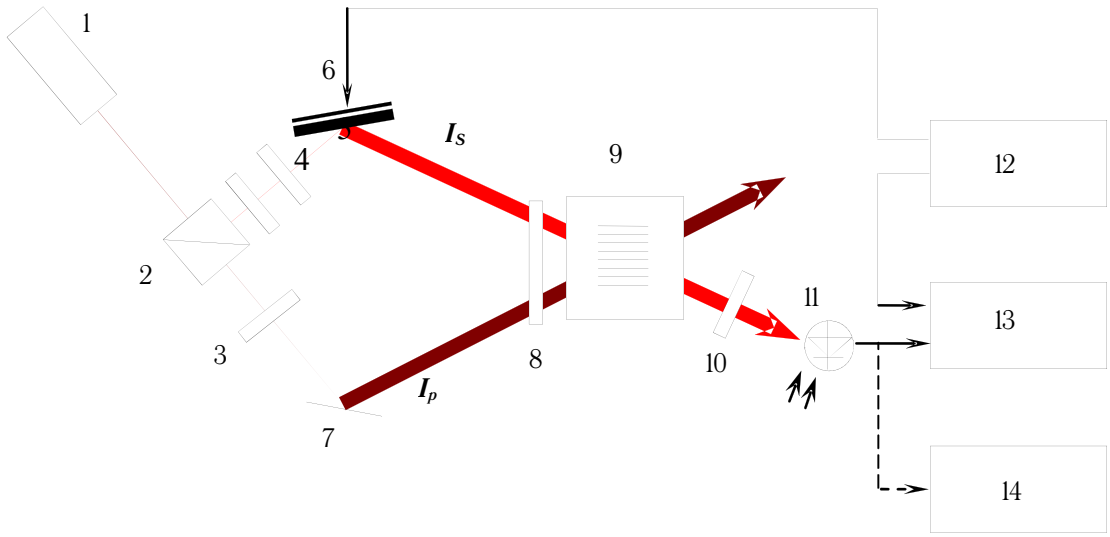
со следующими коэффициентами связи, соответствующими фазовой составляющей голограммы:

$$\Gamma_E=k_0\frac{n_0^3 r_{41}^S E_{SC}}{2},$$
$$\Gamma_{f1}=k_0 n_0^3\frac{f_{1111}}{4C_{11}}p_1^{eff}KE_{SC}, \quad (8)$$
$$\Gamma_{f2}=k_0 n_0^3\frac{f_{1111}}{4C_{11}}p_2^{eff}KE_{SC},$$

где $J_n(\varphi_m)$ — функция Бесселя n-го порядка и φ_m — амплитуда фазовой модуляции; ρ — удельное оптическое вращение; ϕ — угол между векторами поляризации взаимодействующих волн и осью [010] на входной грани кристалла $x=0$, отсчитываемый к оси [001]; Γ_a — коэффициент связи для абсорбционной компоненты голограммы; $k_0=2\pi/\lambda$, λ — длина волны света; n_0 — показатель преломления невозмущенного кристалла и r_{41}^S — компонента его электрооптического тензора в зажатом состоянии; f_{1111} и C_{11} — компоненты флексоэлектрического тензора и тензора модулей упругости кристалла, а эффективные фотоупругие постоянные $p_{1,2}^{eff}=2p_{11}\pm p_{12}\pm p_{13}$ определяются здесь его упругооптическими коэффициентами p_{11}, p_{12} и p_{13}.

Как следует из соотношений (6) и (8), присутствие в выходном сигнале фазовой демодуляции первой гармоники с относительной амплитудой $M^{(1)}$ возможно только за счет вклада в фоторефрактивный отклик обратного флексоэлектрического и фотоупругого эффектов.

Схема установки для экспериментальных исследований эффекта фазовой демодуляции при попутном взаимодействии сильной стационарной волны накачки со слабой фазово-модулированной сигнальной волной на фоторефрактивной голограмме пропускающего типа, формируемой ими в кристалле силиката висмута среза (110), показана на рис. 1.



1 — лазер; 2 — делительный кубик; 3, 5 — поляризационные оптические системы; 4 — светофильтр; 6 — колеблющийся объект; 7 — неподвижное зеркало; 8 — поляризатор; 9 — фоторефрактивный кристалл; 10 — анализатор; 11 — фотодиод; 12 — генератор сигналов; 13 — осциллограф; 14 — универсальный вольтметр
Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер 1 ($\lambda = 633$ нм), пучок которого с помощью делительного куба 2 создавал сигнальную и опорную волны с интенсивностями I_S и I_P соответственно. Светофильтр 4 обеспечивал соотношение интенсивностей интерферирующих волн $I_S << I_P$, а оптические системы 3 и 5 задавали поляризацию сигнального и опорного пучков перед поляризатором 8, близкую к круговой. Последний позволял задавать необходимый одинаковый угол ориентации ϕ векторов линейной поляризации опорного и сигнального пучков на входной грани кристалла 9, который представлял образец силиката висмута среза (110) с толщиной $d = 2{,}64$ мм и с удельным вращением $\rho = -21{,}6\,^{\circ}/$мм для $\lambda = 633$ нм. Данный образец закреплялся в держателе, позволяющем изменять ориентацию его кристаллографических осей относительно вектора голографической решетки вращением вокруг оси, совпадающей с направлением [110].

Фазовая модуляция сигнальной волны осуществлялась с помощью зеркала 6, приклеенного к пьезокерамическому цилиндру, на который через согласующий трансформатор подавался электрический сигнал с частотой $\Omega = 1150$ Гц от звукового генератора 12. Амплитуда данного сигнала на электродах цилиндра выбиралась равной 70 В, что соответствовало значению $\varphi_m = 1{,}044$ рад. Сигнал фазовой демодуляции выделялся фотодиодом 11 (BPW-34, работающий в фотодиодном режиме детектирования при сопротивлении нагрузки $R_L = 51$ кОм и напряжении смещения 7,1 В) и поступал на вход осциллографа 13 модели Tektronix TDS 2012C. Компьютерная система обработки этих данных позволяла в цифровом виде фиксировать в моменты времени t_i выборки сигнала фазовой демодуляции с длительностью около 2,5 мкс, с интервалом в 1 с между ними, и далее аппроксимировать их разложением на гармоники с частотами Ω, 2Ω, 3Ω и 4Ω. Необходимая для вычисления амплитуд $M^{(n)}$ постоянная составляющая выходного сигнала измерялась универсальным вольтметром 14.

Типичная осциллограмма выходного сигнала демодуляции для голограммы с вектором решетки, ориентированным вдоль оси [001] образца, и пространственным периодом $\Lambda = 0{,}6$ мкм, полученная при входном поляризационном угле $\phi = 30^{\circ}$ в момент времени $t_i = 450$ с, показана точками на рис. 2а. Сплошная кривая на данном рисунке соответствует

аппроксимации с использованием соотношения (5) при значениях относительных амплитуд гармоник $M^{(1)} = 0{,}00707$; $M^{(2)} = 0{,}00472$ и $M^{(3)} \approx 0{,}00026$ и $M^{(4)} \approx 0$.

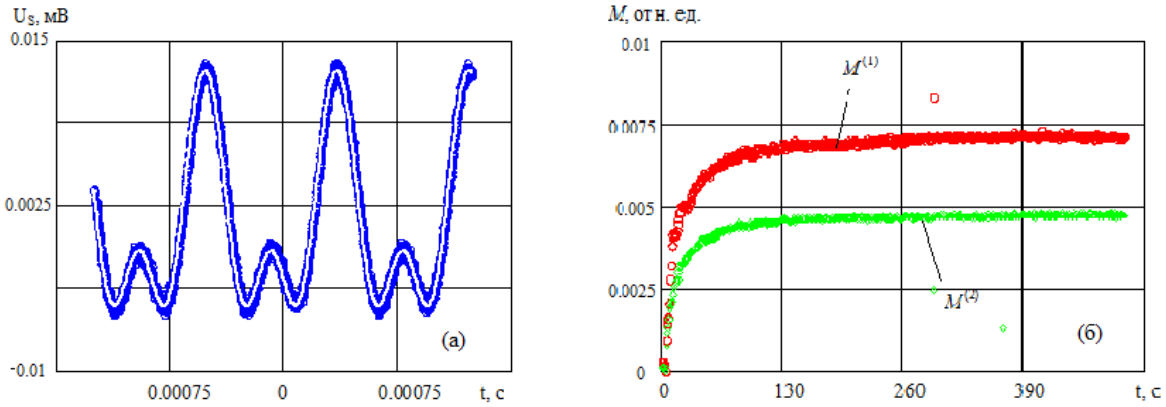


Рис. 2 Осциллограмма выходного сигнала фазовой демодуляции (а); временная зависимость относительных амплитуд первой и второй гармоник в выходном сигнале (б)

Используемая методика позволяет определить временные зависимости $M^{(1)}(t_i)$ и $M^{(2)}(t_i)$, которые для описанных выше условий эксперимента и для «включения» сигнального пучка в момент времени $t_i = 0$ представлены на рис. 2б.

Таким образом, выходной сигнал фазовой демодуляции при попутном взаимодействии световых волн на динамических голограммах диффузионного типа в кристалле силиката висмута среза (110) при описанных выше условиях эксперимента содержит первую гармонику частоты модуляции, превышающую по амплитуде вторую гармонику, что может быть связано с заметным флексоэлектрическим вкладом в фоторефрактивный отклик в исследованном образце.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 1.2.01 Государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника») и БРФФИ (проект Ф15-154); Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2015 год и НИР по проектной части Госзадания № 3.878.2014/ИК, а также РФФИ (проект № 16-29-14046-офи_м).

Источники

[1] Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко — СПб: Наука, 1992. — 320 с.

[2] Кульчин Ю.Н. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей / Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.А. Камшилин, Р.В. Ромашко. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 288 с.

[3] Delaye P. Detection of ultrasonic vibrations on rough surfaces through the photorefractive effect / P. Delaye, A. Blouin, L.-A. de Montmorillon, A. Biaggo, D. Drolet, J.-P. Monchalin, G. Roosen // Proc. SPIE. — 1996. — Vol. 2782. — P. 464–475.

[4] Kamshilin A.A. Adaptive interferometry with photorefractive crystals / A.A. Kamshilin, R.V. Romashko, Yu.N. Kulchin // J. Appl. Phys. — 2009. — Vol. 105 (3). — P. 031101.

[5] Колегов А.А. Адаптивная интерферометрия, использующая динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах / А.А. Колегов, С.М. Шандаров, Г.В. Симонова, Л.А. Кабанова, Н.И. Буримов, С.С. Шмаков, В.И. Быков, Ю.Ф. Каргин // Квантовая электроника. — 2011. — Том 41. — №9. — С. 847–852.

[6] Буримов Н.И. Амплитудная характеристика адаптивного интерферометра, использующего встречное взаимодействие в кристалле Bi12TiO20 среза (100) / Н.И. Буримов, С.М. Шандаров, С.С. Шмаков, А.А. Шмидт // Изв. Вузов. Физика. — 2015. — Том 58. — №11/3. — С. 68–72.

[7] Petrov V. Precise subnanometer control of the position of a macroobject by light pressure / V. Petrov, J. Hahn, J. Petter, M. Petrov, T. Tschudi // Opt. Lett. — 2005. — Vol. 30. — P. 3138–3140.
[8] Петров В.М. Исследование сил казимира методами динамической голографии / В.М. Петров, М.П. Петров, В.В. Брыксин, Е. Петтер, Т. Чуди // ЖЭТФ. — 2007. — Том 131. — С. 798–807.
[9] Romashko R. Resonance micro-weighing of sub-picogram mass with the use of adaptive interferometer / R. Romashko, T. Efimov, Yu. Kulchin // Measurement Science Review. — 2014. — Vol. 14. — No 3. — P. 160–163.
[10] Romashko R.V. Linear phase demodulation via reflection photorefractive holograms / R.V. Romashko, Yu.N. Kulchin, A.A. Kamshilin // OSA TOPS. Photorefractive Effects, Materials, and Devices: Proceeding Volume. — Washington, DC: Optical Society of America, 2005. — Vol. 99. — P. 675–680.
[11] Shandarov S.M. Two-wave mixing on reflection dynamic gratings in sillenite crystals under phase modulation of signal beam / S.M. Shandarov, A.A. Kolegov, N.I. Burimov, V.I. Bykov, V.M. Petrov, Yu.F. Kargin // Phys. Wave Phenomena. — 2009. — Vol. 17. — №1. — P. 39–44.
[12] Шандаров С.М. Обнаружение вклада обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в монокристалле титаната висмута / С.М. Шандаров, С.С. Шмаков, Н.И. Буримов, О.С. Сюваева, Ю.Ф. Каргин, В.М. Петров // Письма в ЖЭТФ. — 2012. — Том 95. — №12. — С. 699–702.
[13] Шандаров С.М. Вклад обратного флексоэлектрического эффекта во встречное двухволновое взаимодействие световых пучков в фоторефрактивных кристаллах / С.М. Шандаров, С.С. Шмаков, П.В. Зуев, Н.И. Буримов, Ю.Ф. Каргин, В.В. Шепелевич, П.И. Ропот, В.Г. Гуделев // Оптический журнал. — 2013. — Том 80. — №7. — С. 5–12.
[14] Shandarov S.M. Revealing of the flexoelectric parameters in cubic photorefractive crystals using two-beam coupling / S.M. Shandarov, N.I. Burimov, A.O. Zlobin, V.I. Bykov, K.P. Mel'nik, V.V. Shepelevich, A.V. Makarevich, Y.F. Kargin, K. Shcherbin // In: Photorefractive Photonics 2015, Villars, Switzerland, 16-19 June 2015. — 7
[15] Шандаров С.М. Вклад обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в титанате висмута / С.М. Шандаров, Н.И. Буримов, С.С. Шмаков, П.В. Зуев, А.Е. Урбан, В.С. Горбачев, Ю.Ф. Каргин, В.В. Шепелевич // Известия РАН. Серия физическая. — 2012. — Том 76. — №12. — С. 1452–1455.
[16] Shandarov S.M. Revealing of the flexoelectric parameters in photorefractive crystals using two-beam coupling on reflection gratings / S.M. Shandarov, N.I. Burimov, S.S. Shmakov, A.E. Urban, A.A. Shmidt, A.O. Zlobin, V.V. Shepelevich, K. Shcherbin // In: 23rd congress of the international commission for optics, Santiago de Compostela, Spain, 26–29 August 2014.
[17] Злобин А.О. Фазовая демодуляция в голографическом интерферометре, использующем встречное взаимодействие в кристаллах силленитов среза (111) / А.О. Злобин, А.А. Шмидт, Н.И. Буримов, С.М. Шандаров, В.В. Шепелевич, Ю.Ф. Каргин // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2015. — Том 58. —№11/3. — С. 64–67.
[18] Shandarov S. Two-beam coupling in sillenite crystals / S. Shandarov, A. Reshet'ko, A. Emelyanov, O. Kobozev, M. Krause // Proc. SPIE. — 1996. — Vol. 2969. — P. 202–210.

Phase demodulation of light fields in laser interferometry based on dynamic diffusion holograms in photosensitive crystals

S.M. Shandarov[1], N.I. Burimov[1], S.S. Smakov[1], A.O. Zlobin[1], V.I. Bykov[1], V.V. Shepelevich[2], A.V. Makarevich[2], K. Shcherbin[3]
[1] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia
[2] I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Mozyr, Belarus
[3] Institute of Physics, National Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

We report the theoretical consideration the effects of phase demodulation in adaptive holographic interferometers, which are realized at codirectional interaction of light waves on dynamic hologram of diffusion type in the (110)-cut sillenite crystals. It is shown that a linear regime of phase demodulation can be realized for account of the joint contribution of flexoelectric and elasto-optic effects to the dynamic material response. We experimentally studied the holographic interferometer based on codirectional interaction in the (110)-cut bismuth silicon oxide crystal for light waves with identical linear polarization, which have been used to build-up a hologram having the spatial period of 0.6 μm and the grating vector directed along the [001] crystallographic axis. It was demonstrated that the component relevant to linear regime of phase demodulation is presented in the spectrum of an output signal.

2.4 Голографические сенсоры и возможности их применения

А.В. Крайский[1], В.А. Постников[2], Т.В. Миронова[1], Т.Т. Султанов[1], А.А. Крайский[1], М.А. Шевченко[1]
[1] Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия
[2] ФНКЦ физико-химической медицины, ФМБА, Москва, Россия

Голографические сенсоры (ГС) — это новый класс диагностических устройств для определения компонентов растворов [1–5]. В [2] введено определение ГС: это «аналитические устройства, отражающие узкополосный свет от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов, предназначенные для обнаружения и количественного определения аналитов и/или физических параметров». Они могут применяться для измерения кислотности (pH) водных растворов, содержания ионов металлов, для анализа содержания спирта в растворе, содержания воды в углеводородном топливе, содержания глюкозы в крови и в других биологических жидкостях, метаболитов, наличия роста бактерий, спор бактерий, влажности атмосферы, для анализа лактата в плазме крови, содержания сорбитола, содержания мочевины, содержания горючих углеводородных газов в воздухе и т.д. Голографические сенсоры могут применяться в различных областях: медицине, пищевой промышленности, мониторинге окружающей среды, в частности водных ресурсов, и т.п. Можно с уверенностью утверждать, что сенсоры можно будет применять в быту, причем в массовом порядке.

ГС представляют собой матрицу на основе полимерного гидрогеля толщиной от 10 до 50 мкм, закрепленную на прозрачной подложке. В матрице образованы периодические слоистые структуры с изменяющимися оптическими свойствами, образующие голограмму Денисюка. При освещении белым светом голограмма отражает монохроматическое излучение с длиной волны в среде, равной примерно удвоенному периоду структуры. Как правило, эти структуры изготавливают фотографическим способом, получая в матрице слои нанозерен серебра или его соединений при интерференции двух встречных когерентных лазерных пучков. Эти слои мы будем называть интерференционными слоями. Они представляют собой слои нанозерен серебра, или соединений серебра. В матрицу встроены специальные вещества, при взаимодействии которых с определяемым веществом изменяется набухание (или сжатие) матрицы, тем большее, чем больше содержание вещества. Это приводит к изменению периода слоев и, следовательно, длины волны отраженного излучения. Определяя визуально изменение цвета отраженного света или измеряя это изменение длины волны спектрометром или другими способами можно судить о содержании искомого вещества.

При точных измерениях важно выбрать параметры ГС таким образом, чтобы обеспечить правильный режим его работы. Точность измерения длины волны должна быть достаточной для измерения тестируемого параметра. При работе с малогабаритным спектрометром, аппаратная функция которого имеет спектральную ширину около 5 нм, и шириной измеренной полосы 8–10 нм, стандартное отклонение положения максимума составляло 0,05 нм. Точность связана со спектральной шириной, которая при малой дифракционной эффективности (ДЭ) η определяется выражением $\Delta\lambda = 0{,}886\lambda/N$, где N — число интерференционных слоев. ДЭ должна быть достаточной для нормальной работы регистрирующей системы. Однако при большой ДЭ излучение не проникает вглубь в голографический слой, что приводит к уменьшению числа интерферирующих слоев, строящих отраженное излучение, и, следовательно, уширяет линию отражения [6–7], что может понизить точность измерения. Реально должно выполняться неравенство $\eta \leqslant 0{,}1$. Следует иметь в виду, что при диффузионном механизме распространения компонентов раствора

внутри слоя увеличение толщины голографического слоя должно приводить к увеличению времени установления равновесного распределения концентрации по глубине слоя.

Для обеспечения правильного режима работы ГС необходимо определять основные параметры голографического слоя: толщину и амплитуду переменной части показателя преломления. Это можно делать по ширине и глубине брэгговского провала в спектре пропускания голограммы [6]. Для малых значений ДЭ параметры вычисляются по простым формулам, для больших ДЭ был разработан специальный алгоритм.

При исследовании реакции ГС на основе акриловой кислоты на титрование раствора щелочи соляной кислотой от pH = 11,8 до 2,8 при резком падении кислотности и длины волны наблюдалось резкое и сильное, почти на порядок, увеличение ДЭ [3, 4]. Это надо иметь в виду при выборе режима работы сенсора.

В случае водных растворов этилового спирта в области концентраций от 0 до 47% изменение длины волны сенсора на основе акриловой кислоты перекрывало весь видимый диапазон от 780 до 380 нм [3, 4].

Нами были изучены отклики сенсоров на основе акриловой кислоты на ионы ряда металлов в воде в широком диапазоне концентраций от 10^{-7} до 0,1 М [3, 4]. По характеру отклика ионы разделились на 3 группы: с наибольшей чувствительностью 10^{-5} М — ионы Pb^{2+} и Co^{3+}, с существенно меньшей чувствительностью — ионы щелочных металлов Na^{+}, K^{+}, с еще меньшей чувствительностью — ионы других двухвалентных металлов (Mg^{2+}, Sr^{2+}и Mn^{2+}). Таким образом, ГС могут быть датчиками, показывающими жесткость воды.

При измерении содержания глюкозы в плазме крови возникает проблема: на чувствительность сенсора к глюкозе влияют ионы щелочных металлов, содержащиеся в плазме с концентрацией 0,15 М. Чувствительность к глюкозе при этом снижается более чем на порядок. Проблема была решена при помощи специальной пробоподготовки, переобразующей глюкозу в шестиатомный спирт сорбит [8]. В результате чувствительность была повышена до 200–400 нм/ммоль. Стандартное отклонение при измерении длины волны у нас при ширине линии около 10 нм составляло 0,05 нм. В соответствии с этим максимальная точность определения концентрации глюкозы зависит от свойств конкретной голограммы и в разведенном измеряемом образце составляла до $1{,}0 \cdot 10^{-4}$ мМ. Для голограммы, использованной в реальном эксперименте с микрофлюидной техникой, эта точность составляла у нас $8{,}0 \cdot 10^{-4}$ мМ, что в пересчете на исходный образец плазмы крови составляет 0,015 мМ глюкозы. Эта точность более чем в 6 раз лучше, чем у эталонного анализатора «YSI 2300 STAT PLUS», предел относительного среднего квадратичного отклонения измерений которого не превышает ±2%. Точность ГС значительно превосходит требования по международному стандарту ISO15197–2013 для электронных глюкометров, по которым 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 5,55–0,83 ммоль/л.

Существенным преимуществом ГС перед многими другими является простота использования их в многоканальном варианте. Для реализации всех возможностей такого варианта (в частности одновременности обработки многих компонентов и образцов) был разработан колориметрический способ измерения длины волны узкополосного излучения по цифровому изображению [9–10, 4]. В качестве регистратора изображения можно использовать любой бытовой цифровой фотоаппарат, включая встроенный фотоаппарат мобильного телефона.

При работе с обычными фотографическими форматами удалось использовать участок желтой области спектра 570–600 нм с точностью определения длин волн 0,16 нм [9] на мегапиксельном изображении. Переход к работе в RAW-формате [10] позволил расширить

рабочий диапазон до 455–625 нм. Это явилось следствием того, что в этом формате мы работаем с неискаженными компьютером фотоаппарата данными. В этом диапазоне есть перекрытие чувствительностей красной и синей групп сенсоров фотоаппарата, и цветность изменяется монотонно при изменении длины волны. Среднеквадратичный разброс определения длин волн в подавляющей части этого диапазона составил от 0,3 до 2,0 нм. При этом точность определения концентрации может достигать 0,1 ммоль/л.

Сочетание колориметрического метода анализа с многоточечным сенсором открывает возможности проведения одновременно большого количества анализов: до нескольких десятков.

Источники

[1] Patent Application 1995026499 A1 WO. Hologram used as a sensor / C.R. Lowe, R.B. Millington, J. Blyth, A.G. Mayes. — 5.10.1995.
[2] 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. — 1409300950
[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. — 40. — №2. — С. 178–182.
[4] Postnikov V.A. In Holography — Basic Principles and Contemporary Applications / V.A. Postnikov, A.V. Kraiskii, V.I. Sergienko; ed. by E. Mihaylova. — InTech: Rijeka, 2013. — P. 103.
[5] Крайский А.В. Голографические сенсоры для определения компонентов водных растворов / А.В. Крайский, В.А. Постников // Известия ВУЗ'ов ФИЗИКА. — 2015. — Том 58. — №11/3. — С. 40–42.
[6] Крайский А.А. Определение параметров голографического слоя по спектральным характеристикам / А.А.Крайский, А.В.Крайский // Квантовая электроника. — 2016. —46. — №6. — С. 558–566.
[7] Крайский А.В. Оптические свойства голографических сенсоров и колориметрический способ определения длины волны узкополосного светового излучения / А.В. Крайский, В.А. Постников, Т.Т. Султанов, Т.В. Миронова, А.А. Крайский, М.А. Шевченко // Известия ВУЗ'ов ФИЗИКА. — 2015. — Том 58. — №11/3. С. 47–50.
[8] Постников В.А. Голографические сенсоры для определения глюкозы в модельных средах и сыворотке крови / В.А. Постников, В.Е. Тихонов, А.В. Крайский, М.А. Шевченко, В.И. Сергиенко // Известия ВУЗ'ов ФИЗИКА. — 2015. — Том 58. — №11/3. С. 58–60.
[9] Патент №2390738 РФ. Способ измерения длины волны узкополосного светового излучения колориметрическим способом / А.В. Крайский, Т.В. Миронова, Т.Т. Султанов, В.А. Постников, В.И. Сергиенко, В.Е. Тихонов. — 21.05.2008.
[10] Крайский А.В. Измерение поверхностного распределения длины волны узкополосного излучения колориметрическим методом / А.В. Крайский, Т.В. Миронова, Т.Т. Султанов // Квантовая электроника. — 2010. — 40. — №7. — С. 652–658.
[11] Крайский А.В. Измерение длины волны узкополосного излучения при обработке цифровых фотографий в RAW-формате / А.В. Крайский, Т.В. Миронова, Т.Т. Султанов // Квантовая электроника. — 2012. — 42. — №12. — С. 1137–1139.

Holographic sensors and possibilities of their use

A.V. Kraiski[1], V.A. Postnikov[2], T.V. Mironova[1], T.T. Sultanov[1], A.A. Kraiski[1], M.A. Shevchenko[1]
[1] P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2] FNKC of Physical-chemical Medicine, FMBA, Moscow, Russia

Holographic sensors (HS) are a new class of diagnostic equipment for determination of solution components [1–5]. The HS are defined in [2] to be "analytical devices that systematically diffract narrow-band light in the ultraviolet to near-infrared range for application in the detection and quantification of analytes and/or physical parameters".

They can be used to measure the acidity (pH) of water solutions, the concentration of metal ions, the concentration of spirit in water solutions, the glucose concentration in blood and other biological liquids, the metabolite concentration, etc. The HS can be used in: medicine, food industry, monitoring of environment, of water resources, etc.

The HS is the Denisiuk hologram formed in the polymer hydrogel based matrix with thickness from 10 till 50 μm. Being illuminated with the white light, the hologram reflects the monochromatic radiation with the wavelength in media approximately equal to the double structure period. There is special material built-in the structure, its interaction with the detecting matter changing the expansion (or contraction) of the matrix. One can detect the matter under consideration from changing the wavelength of the reflected light.

The accuracy of measurement of the wavelength has to be sufficient to measure the tested parameter. With the reflection band of 8–10 nm, the standard deviation of the maximum wavelength was 0.05 nm. The spectral width at a small diffraction efficiency (DE) η is determined by the formula $\Delta\lambda = 0.886\lambda/N$, where N is the number of diffraction layers. At large DE ($\eta > 0.1$), the radiation does not penetrate deeply into the holographic layer, which leads to broadening the reflection line [6–7]. In order to provide a correct regime of the HS operation, one has to determine the main parameters of the holographic layer: the thickness and the amplitude of the varying part of the refraction index. It can be done basing on the width and deepness of the Bragg reflection band gap in the transmission spectrum using a special algorithm [6].

Titring the alkaline solution with the hydrochloric acid in HS with the acrylic acid base, we observed drastic (almost an order of magnitude) increase of DE [3, 4] with sharp and strong decrease of the acidity and wavelength, which is important for the operating regime of the sensor. In the case of water solutions of the ethyl spirit at concentrations from 0 to 47%, the change of the reflected wavelength covered all visible range from 780 to 380 nm [3, 4]. We studied responses of the sensors with the acrylic acid base to metal ions in water at wide range of concentrations from 10^{-7} to 0.1 M [3, 4]. The ions are divided into three groups: of maximal effect (Pb^{2+}, Co^{3+}), the sensor responses to the concentrations about 10^{-5} M, considerably less affecting alkaline metals Na^{+}, K^{+}, even less affecting other divalent metals (Mg^{2+}, Sr^{2+} Mn^{2+}). Thus, HS can be used as water hardness sensors.

In the blood plasma, there are ions of alkaline metals with concentration 0.15 M. That leads to the decrease of the HS sensitivity by more than an order of magnitude. We report a way to solve the problem in [8]. In this case, the standard deviation for the original pattern of the blood plasma was 0.015 mM of glucose. This accuracy is more than 6 times better than that of the standard analyzer «YSI 2300 STAT PLUS» (±2%). The HS accuracy considerably exceeds the requirements in accordance with the international standard ISO15197-2013 for the electronic glucometers (15%).

To realize all HS abilities (in particular, simultaneous treating multiple components and patterns), we worked out a colorimetric method to measure the wavelength of the narrow band

radiation from a digital image of the sensor [9–10, 4]. When working in the RAW-format [10], the operating range is 455–625 nm. The mean square deviation of the wavelengths at the most of the range was from 0.3 to 2.0 nm, the accuracy of concentration determination was up to 0.1 mM. Combining the colorimetric method with the multipoint sensor opens a possibility of making a large number of analyses at once: up to a few tens.

References

[1] Patent Application 1995026499 A1 WO. Hologram used as a sensor / C.R. Lowe, R.B. Millington, J. Blyth, A.G. Mayes. — 5.10.1995.
[2] Yetisen A. K., Naydenova I., da Cruz Vasconcellos F., Blyth J., Lowe C.R. // Chem. Rev. — 2014. — 1409300950.
[3] Kraiskii A.V., Postnikov V.A., Sultanov T.T., Khamidulin A.V. // Quantum Electronics. — 2010. — 40 (2). — P. 178–182.
[4] Postnikov V.A. In Holography — Basic Principles and Contemporary Applications / V.A. Postnikov, A.V. Kraiskii, V.I. Sergienko; ed. by E. Mihaylova. — InTech: Rijeka, 2013. — P. 103.
[5] Kraiskii A.V., Postnikov V.A. // Izvestija vuzov fizika. — 2015. — Vol. 58. — №11/3. — P. 40–42.
[6] Kraiskii A.A., Kraiskii A.V. // Quantum Electronics. — 2016. — 46. — №6. — P. 558–566.
[7] Kraiskii A.V., Postnikov V.A., Mironova T.V., Sultanov T.T., Kraiskii A.A., Shevchenko M.A. // Izvestija vuzov fizika. — 2015. —Vol. 58. — №11/3. — P. 47–50.
[8] Postnikov V.A., Tikhonov V.E., Kraiskii A.V., Shevchenko M.A., Sergienko V.I. // Izvestija vuzov fizika. — 2015. — Vol. 58. — №11/3. — P. 58–60.
[9] Kraiskii A.V., Mironova T.V., Sultanov T.T. // Quantum Electronics. — 2010. — 40. — №7. — P. 652–658.
[10] Kraiskii A.V., Mironova T.V., Sultanov T.T. // Quantum Electronics. — 2012. — 42. — №12. — P. 1137–1139.

2.5 Волноводные и ПВО голограммы в осветительных и дисплейных системах

А.Н. Путилин
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Голограммы интегрированные в волноводные структуры или оптику на полном внутреннем отражении (ПВО) предложены и изучаются достаточно давно (1), но реальное применение именно таких голограмм, а не более простых интегрально-оптических дифракционных оптических элементов, весьма ограничено. Это связано, прежде всего, с крайней ограниченностью регистрирующих сред пригодных для записи волноводных голограмм, ведь в процессе записи волноводное распространение света в регистрирующей среде происходит со значительным поглощением и волноводное распространение ограничено, возможно использование либо поверхностных слоев в слоистых структурах (evanescent mode), либо ПВО с применением дополнительных элементов связи (запись на зоне связи), либо использование записи и восстановления голограмм на разных длинах волн, но для записи 2D или 3D изображений придется компенсировать значительные хроматические аберрации. В данной работе проводится анализ схем записи волноводных и ПВО голограмм для когерентных систем синтезирования дисплейных голограмм, для осветительных систем 3D дисплеев и голографических виртуальных дисплеев.

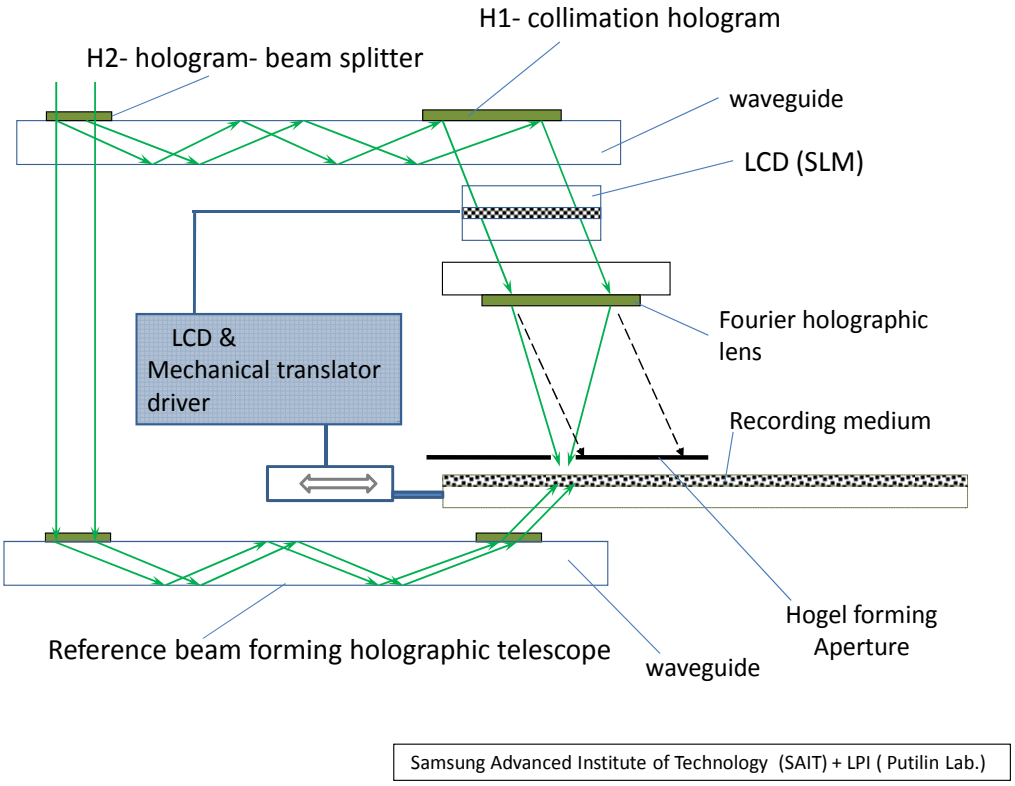


Рис. 1

В качестве примера ниже (рис. 2) приведена схема работы и вид интегральной головки записи синтезированных голограмм, в работе которой используются несколько видов ПВО голограмм (2).

В заключении следует отметить, что интеграция голограмм в оптоэлектронные устройства не просто тенденция в развитии голографии а насущная необходимость, поскольку только высокая технологичность открывает путь массовому применению голографии.

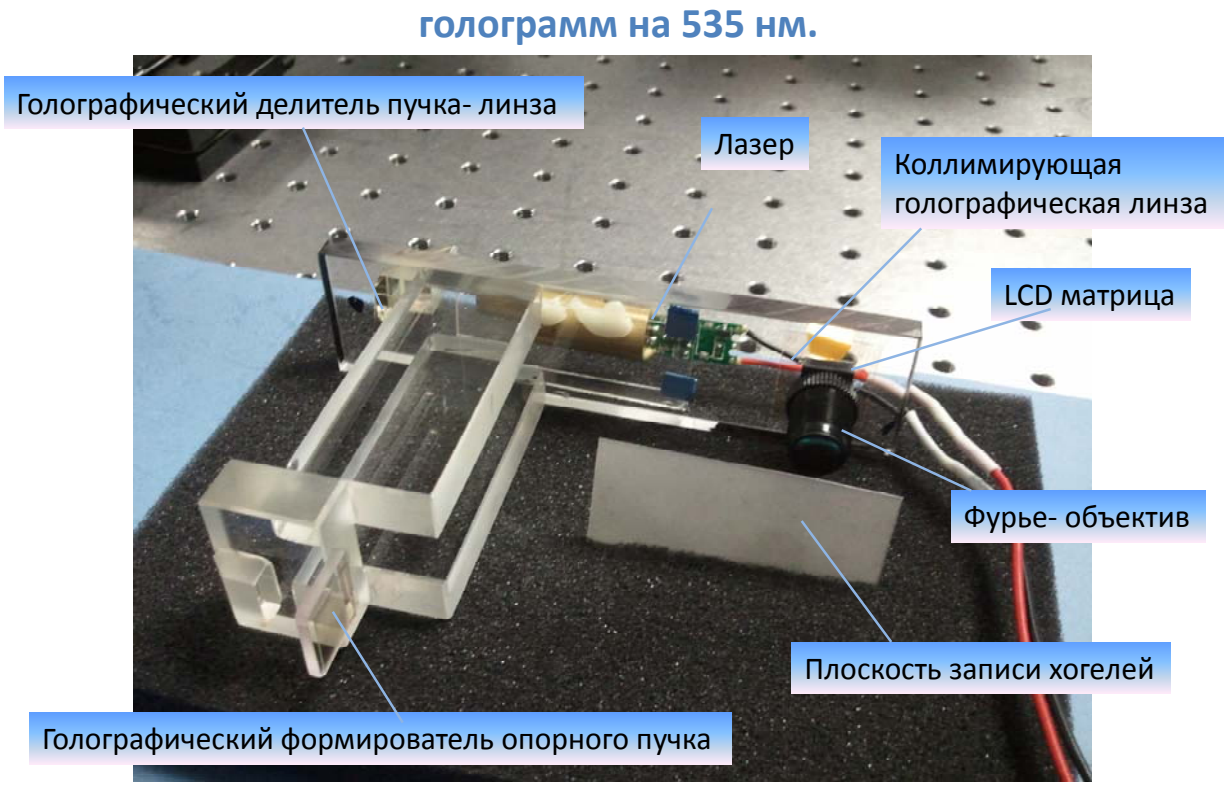


Рис. 2. Схема и вид интегрального устройства для записи синтезированных 3D голограмм

Источники

[1] Kress B.C. Applied Digital Optics: From Micro-optics to Nanophotonics / B.C. Kress, P. Meyrueis. — Wiley, 2009. — P. 638

[2] Patent 9,213,312 US. Holographic 3D printing apparatus and method of driving the same / K. Pyun, A. Putilin, A. Morozov, G. Sung..

Waveguide and TIR holograms in the illumination and imaging systems

A.N. Putilin
Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The holograms that are integrated in the waveguide structure or optics on total internal reflection (TIR) was proposed and studied for a long time (1), but the real application of such a holograms, unlike the more simple integrated optical diffractive elements, is rather limited. This occurs due to the very limited range of the recording media suitable for the waveguide holograms recording. The waveguide propagation of light in the recording medium during the recording process is accompanied with significant light absorption. So the variants of recording methods is limited, one of the possibilities is to use either of the surface layers in the layered structures

(evanescent mode), or TIR scheme using additional coupling elements (recording on the communication area), or the recording and reconstruction of holograms at different wavelengths, but the recording of 2D or 3D images according to this variant requires the compensation of the significant chromatic aberration.

H1- collimation hologram recording scheme

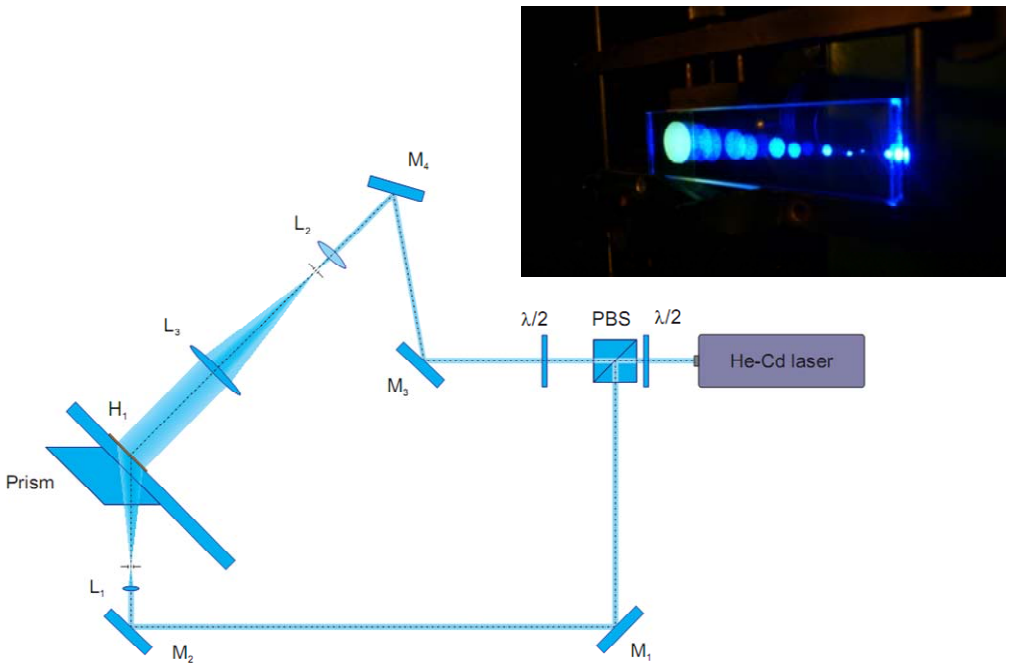


Fig. 1

In this paper, an analysis of the recording schemes of waveguide and TIR holograms for coherent synthesizing display holograms, for illumination systems, 3D holographic displays and virtual displays is provided.

As an example (Fig. 1) shows the scheme of H1 recording for integrated synthesized hologram recording head (2).

2.6 Энергетически эффективные формирователи амплитудно-фазового распределения лазерных пучков для голографии и интерферометрии

О.В. Польщикова, А.Ф. Смык, А.В. Шурыгин
ООО «Наноточность», Москва, Россия

В большинстве оптических систем с использованием лазерного излучения предъявляется ряд требований к его параметрам: однородное амплитудное распределение и состояние поляризации по фронту, пространственная и временная когерентность, плоскостность или сферичность волнового фронта и т.д. Во многих задачах микрообработки материала (маркировка, гравировка, прямая лазерная запись и т.п.) для достижения высокой точности и качества обработки прибегают к трансформации гауссова профиля пучка в так называемый π-профиль [1], или плоский профиль (рис. 1), характеризующийся однородным амплитудным распределением. Задача состоит в том, чтобы как можно более эффективно использовать энергию, заключенную в лазерном пучке, и управлять его формой. Для этих целей применяют рефракционные корректоры, представляющие собой афокальную оптическую систему с коллимированными пучками на входе и выходе (рис. 2). Первый компонент системы вносит контролируемую волновую аберрацию [2], перераспределяющую энергию от центра к периферии пучка, а второй компонент компенсирует эту аберрацию. В результате на выходе такой системы получается однородное амплитудное распределение и плоский волновой фронт, при этом остаточные фазовые искажения пренебрежимо малы. Структура и расходимость пучка не нарушаются.

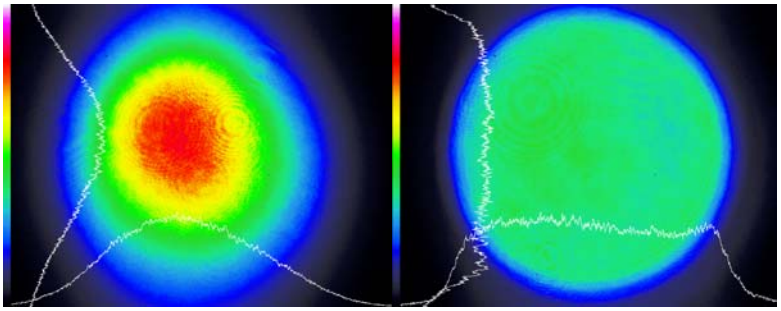


Рис. 1. Гауссов (слева) и плоский (справа) профиль лазерного пучка

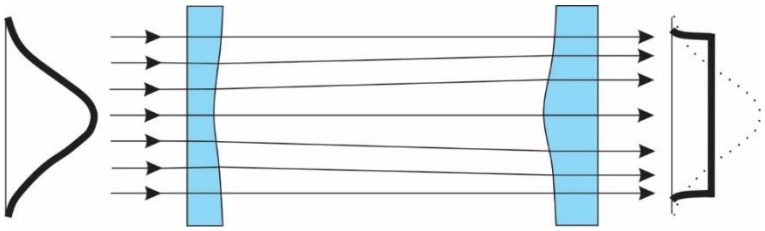


Рис. 2. Схема рефракционного корректора

Рефракционные корректоры требуют соблюдения номинального диаметра и коллимированности пучка на их входе, а также точного ввода излучения в них, для чего используется прецизионная оптомеханика. Но результаты использования пучка с π-профилем (однородное снятие материала, получение острых краев и ступенек, равномерная засветка) полностью окупают эти затруднения.

Системы коррекции профиля пучка характеризуются также достаточно большим значением глубины «изображения». Например, для одномодового коллимированного пучка с

длиной волны $\lambda = 405$ нм и диаметром 6 мм по уровню энергии $1/e^2$ на входе корректора однородность распределения энергии в пучке в пределах $\pm 10\%$ сохраняется на протяжении 200–1000 мм.

В голографических и интерферометрических системах, работающих с плоским по амплитуде и фазе пучком, особенно важно сохранить его целостность. Альтернативные подходы — использование микролинзовых растров, микрозеркал и призм — разрушают структуру пучка, а следовательно, не подходят для большинства задач интерферометрии [3]. Использование диафрагм и аподизационных фильтров приводит к частичной потере энергии пучка. Поэтому оптимальным решением остаются рефракционные корректоры.

В докладе представлены результаты применения рефракционных корректоров в устройстве прямой записи 2D голограмм, построенном по принципу интерференционного дот-матрикса, а также в системе Световое перо. Приведены также результаты измерения фазы пучка по фронту в голографическом интерферометре ВНП-база.

Источники

[1] Laskin A. Building beam shaping optics for micromachining / A. Laskin, V. Juzumas, A. Urniežius, V. Laskin, G. Šlekys, et al. // Components and Packaging for Laser Systems. SPIE Proc. — 2015. — Vol. 9346. — P. 934615.
[2] Laskin A. Beam shaping to improve holography techniques based on Spatial Light Modulators / A. Laskin, V. Laskin // Emerging Liquid Crystal Technologies VIII. SPIE Proc. — 2013. — P. 864201.
[3] Laskin A. Collimating beam shaper for holography and interferometry / A. Laskin, V. Laskin // Practical Holography XXVII: Materials and Applications. SPIE Proc. — 2013. — Vol. 8644. — P. 864406.

Energy effective amplitude and phase laser beam shaping optics for holography and interferometry

O.V. Polschikova, A.F. Smyk, A.V. Shurygin
OOO “Nanotochnost”, Moscow, Russia

Beam shaping technique is becoming more and more important for the purposes of micromachining, marking, scribing, etc. Beam shapers are used to transform the Gaussian profile of a laser beam to a flattop one, having almost uniform amplitude distribution and thus improving the quality of the material processing. The results of the refractive beam shaping optics application in the interference dot matrix system for direct recording of 2D holograms and also in the Light Pen system are presented.

Устные доклады
Секция №3

Объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии

Oral presentations
Section №3

3.1 Сравнение характеристик гибридных фотополимерных материалов «Гибример-Татс» и «ORMOCOMP», предназначенных для прямой лазерной записи

Н.Г. Миронников[1], В.П. Корольков[1], Д.И. Деревянко[2], В.В. Шекловников[2], А.Г. Полещук[1]
[1]Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия
[2]Институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Введение

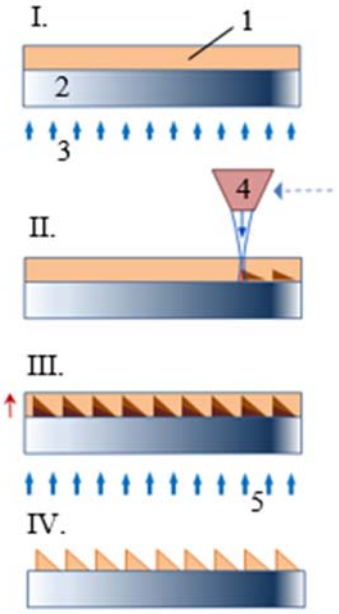
Фотополимерные органические-неорганические композиции активно исследуются для задач построения различных микрооптических элементов. Фотоотверждённые структуры из таких фотоматериалов значительно превосходят по механическим качествам стандартные фоторезисты типа AZ15XX и S18XX. Среди самых известных и коммерчески доступных являются Ormocer и SU-8. Материал Ormocer (сокращение от organically modified ceramics), разработанный Фраунгоферовским институтом исследования силикатов (ISC), является гибридным УФ-фотоотверждаемым полимером и имеет несколько вариантов композиции для различных технологий изготовления микрооптических компонентов (OrmoComp, InkOrmo, OrmoClear, OrmoCore, OrmoClad, OrmoStamp) [1]. Наиболее подходящим для задач лазерной записи является фотополимер OrmoComp®, который позволяет наносить методом центрифугирования слои толщиной менее 10 мкм, а также обладает повышенной механической твердостью и низким температурным расширением.

Также существуют отечественные разработки гибридных органически-неорганических фотополимеров. В НИОХ СО РАН на основе тетракрилатных (ТА) и тиол-силоксановых (ТС) олигомеров была синтезирована гибридная фотополимерная композиция «Гибример-ТАТС» [2]. В качестве инициатора фотополимеризации в композицию добавляется гексафторфосфат 2,4-диэтил-9-оксо-10-(4-гептилоксифенил)-9Н-тио-ксантения в качестве 5%-ой по весу добавке к раствору тетраакрилатных олигомеров в хлороформе. Добавление инициатора фотополимеризации приводит к увеличению поглощения в области 370–430 нм [3]. В работе [4] показано, что олигомеры в композиции можно смешивать в различных соотношениях, что приводит к модификации термооптических, механических и прочностных характеристик фотоотвержденного материала в широких пределах.

В этой работе изучены оптические методы формирования многоуровневого микрорельефа в тонких пленках фотополимеризованного гибридного материала «Гибример-ТАТС», и коммерчески выпускаемого аналога OrmoComp® из серии гибридных фотополимеров Ormocer®.

Экспериментальная часть

За основу схемы процесса формирования многоуровневых микроструктур был взят процесс, описанный в работе [5], для изготовления бинарных структур в слоях OrmoComp®. После ряда экспериментов этот процесс был дополнен. Разработанный нами процесс получения многоуровневых микроструктур в пленках «Гибример-ТАТС» и Ormocomp® представлен на рис. 1 и состоит из следующих этапов:



1 — пленка, 2 — подложка, 3 и 5 — УФ экспонирование, 4 — объектив лазерной записи
Рис. 1. Поэтапная схема получения многоуровневых микроструктур

Нанесение и предэкспозиция

- Приготовление пленок. На подготовленную стеклянную подложку диаметра 60 мм наносили 200 мг раствора «Гибример-ТАТС» с соотношением ТА к ТС как 2:1 или Ormocomp®. Методом центрифугирования достигалась толщина пленки ≈10 мкм при 6000 об/сек для OrmoComp® и 4000 об/сек для «Гибример-ТАТС».

- Этап предварительной сушки от остатков растворителя и улучшения качества пленки осуществлялось на программируемой печи при температуре 95°С в течение 5 мин для пленок OrmoComp® и 2 мин для «Гибример-ТАТС».

- Для повышения фоточувствительности пленок выполнялось равномерное УФ предэкспонирование на длине волны 405 нм с дозами 0,1 и 0,3 Дж/см^2 для OrmoComp® и «Гибример-ТАТС» соответственно.

Лазерная запись многоуровневых структур.

- Запись сфокусированным непрерывным лазерным пучком на длине волны 405 нм происходила на установке круговой лазерной записи КЛЗС производства ИАиЭ СО РАН [6]. Были записаны многоуровневые дифракционные структуры периодом 100 мкм и линейно изменяющейся дозой экспозиции до 1,95 Дж/см^2. Диаметр пучка и скорость его сканирования составляет 0,8 мкм и 630 мм/сек соответственно.

Пост-экспозиция

- Дополнительный этап равномерной УФ экспозиции с дозой порядка ≈1 Дж/см^2 и временем около ≈5 мин, приводит к росту структур.

Проявление

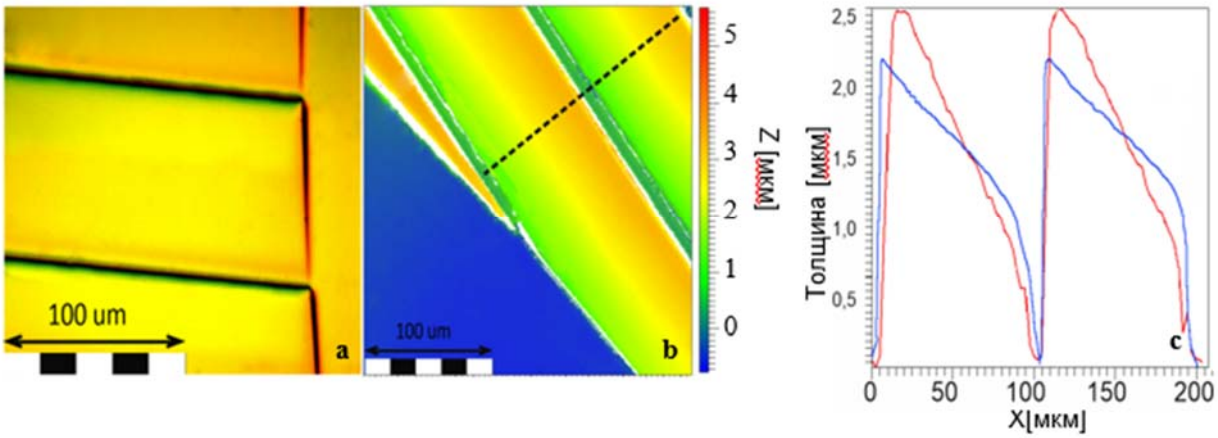
- Время проявления структур для OrmoComp® с помощью фирменного проявителя Ormodev составляет не более 1 минуты при температуре 25°С. Для «Гибримера-ТАТС» при тех же условиях проявителем является этиловый эфир левулиновой кислоты.

Сушка в печи при температуре 150°С в течение 1–4 часов для полной полимеризации структур.

Также были проведены записи, в которых частично или полностью отсутствуют этапы пред- и пост-экспозиции.

Результаты и их обсуждение

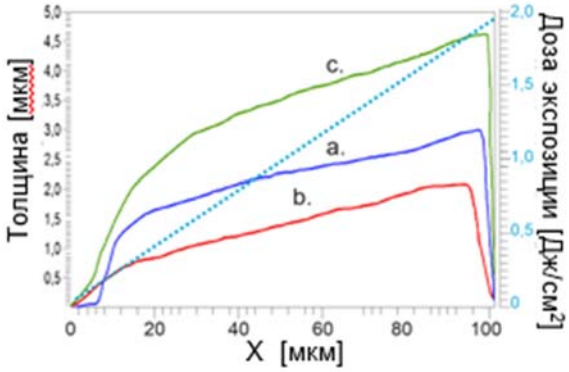
На рис. 2 фото и профилограммы получены с помощью микроскопа Carl Zeiss и интерферометра белого света WLI (Breitmeier Messtechnik GmbH, Германия). 3D профилограмма дифракционных структур «Гибример-ТАТС» имеет глубину 4,5 мкм, профиль которой также представлен на рис. 3 под индексом «с».



a — фото, b — 3D профилограмма структур Гибример-ТАТС,
c — профили решеток «Гибример-ТАТС» (красный) и OrmoComp® (синий)
Рис. 2

Для «Гибример-ТАТС» шероховатость поверхности не превышает 30 нм (PV), что сопоставимо с качеством структур OrmoComp®. На рис. 2с приведены наложенные друг на друга профили двух дифракционных периодов на основе «Гибример-ТАТС» и OrmoComp®, полученные с соблюдением всех технологических этапов. При почти одинаковых условиях квазилинейный диапазон для OrmoComp® не превысил 1 мкм, в то время как для «Гибример-ТАТС» он составляет более 2,2 мкм. С другой стороны характеристики обратного ската более чем в полтора раза меньше для OrmoComp®.

Влияние этапов пред- и пост-экспозиции, на характер профиля периода представлено на рис. 3. Для наглядности слева указана зависимость дозы экспозиции от положения в периоде. Профиль «а» имеет квазилинейный участок высотой 1,5 мкм, при этом имеет ярко выраженный «скачок» характерный для контрастных материалов. При добавлении этапа пред-экспозиции (профиль «b») контрастность снижается, однако значительно увеличивается величина обратного ската (2,2 раза). Этап пост-экспозиции в варианте «с» существенно увеличивает глубину периода, однако скорость роста структур происходит неравномерно, что приводит к значительному изгибу профиля. Величина квазилинейного участка в этом случае достигает 2,5 мкм, а структуры расположены на фотополимеризованном слое толщиной 3 мкм. С другой стороны, этап пост-экспозиции почти не влияет на размер обратного ската (увеличение ≈5%), а также сглаживает поверхность.



а — без пред- и пост-экспозиции, б — без пост-экспозиции, с — все этапы выполнены
Рис. 3 Слева — XY профили дифракционного периода «Гибример-ТАТС» в различных условиях записи, справа — наглядная зависимость дозы экспозиции от координаты периода

Заключение

В работе были определены параметры технологических процессов изготовления многоуровневых микроструктур методом прямой лазерной записи на длине волны 405 нм в пленках «Гибример-ТАТС» и OrmoComp®. Показано, что использование дополнительных этапов равномерной экспозиции пленок существенно увеличивает квазилинейный диапазон зависимости глубины рельефа от мощности пучка.

Источники

[1] Hybrid Polymers. Micro resist technology / URL: http://microresist.de/en/product/hybrid-polymers.
[2] Shelkovnikov V.V. Synthesis and thermomechanical properties of hybrid photopolymer films based on the thiol-siloxane and acrylate oligomers / V.V. Shelkovnikov, L.V. Ektova, N.A. Orlova, et al. // J. Mater. Sci. — 2015. — №50. (23). — P. 7544–7556.
[3] Лоскутов В.А. Синтез гексафторфосфатов 2-оксо-10-(гептилфенил)тиоксантения / В.А. Лоскутов, В.В. Шелковников // Журн. орган. химии. — 2006. — Том 42. — №2. — С. 313.
[4] Миронников Н.Г. Исследование оптических и термооптических характеристик гибридного фотополимерного материала на основе тиол-силоксановых и акрилатных олигомеров / Н.Г. Миронников, В.П. Корольков, Д.И. Деревянко, В.В. Шелковников, О.Б. Витрик, А.Ю. Жижченко // Автометрия. — 2016. — №2. — С. 88–96
[5] Singh A. Laser Direct Writing of Thick Hybrid Polymers for Microfluidic Chips / A. Singh, G. Scotti, et al. // Micromachines. — 2014. — 5 (3). — P. 472–485.
[6] Korolkov V.P. Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements / V.P. Korolkov, A.G. Poleshchuk // SPIE Proc. — 2007. — Vol. 6732. — P. 67320X.

The comparison of the characteristics of hybrid photopolymeric materials "HYBRIMER-TATC" and "ORMOCOMP", for direct laser writing

N.G. Mironnikov[1], V.P. Korolkov[1], D.I. Derevyanko[2], V.V. Shelkovnikov[2], A.G. Poleshchuk[1]
[1]Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
[2]Novosibirsk institute of organic chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The applications of hybrid organic-nonorganic photopolymers are being actively researched for fabrication of microstructured optical components. The optical microstructures fabricated on the photopolymers have much better chemical resistance and thermomechanical stability than the structures formed in standard positive photoresists based on novolac resins. Hybrid photopolymers (HP) have potential for manufacturing of phase multi-level micro-optical elements without transfer of their surface profile from photoresist to optical substrate that is usually made by expensive reactive ion etching. However, HP such as OrmoComp® (one of the UV-photocurable Ormocer® polymers delivered by Micro Resist Technology GmbH) is mainly used only for replication of micro-optical elements. It is also known the OrmoComp® due to high-contrast characteristic curve can be used for direct laser writing of deep binary microstructures intended for micro-electromechanical systems. Our task was to investigate a possibility of direct laser writing of multilevel diffractive structures on hybrid photopolymers. Besides OrmoComp® we investigated Hybrimer-TATC based on thiolsiloxane and acrylate oligomers. It is synthesized in NIOCH SB RAS (Russia).

Laser writing was done by circular laser writing system CLWS-300IAE developed in IAE SB RAS.

Possibility of direct laser writing of multi-level diffractive structures has been investigated for both hybrid photopolymers mentioned above. It was offered to use additional technological steps of pre-exposure and post-exposure to obtain more linear characteristic curves. Studied hybrid photopolymers can be used for fabrication of diffractive structure with 1–3 μm profile depth. Hybrimer-TATC allows one to fabricate deeper multi-level structures but with larger backward slope. It makes the material more suitable for microoptical elements like refractive microlens arrays.

3.2 Особенности воздействия излучения на образцы полимерного материала «Диффен»

О.В. Андреева, Б.Г. Манухин, Д.А. Мосейко, Н.В. Андреева
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Полимерные среды с диффузионным проявлением на основе полиметилметакрилата (ПММА) и светочувствительного соединения фенантренхинон (ФХ) представляют собой перспективный регистрирующий материал для создания высокоселективных голограммных оптических элементов (ГОЭ), записи и хранения информации, а также в исследовательских целях [1–5].

«Диффен» является одной из модификаций таких сред (ПММА/ФХ), получение голограмм на которых включает три этапа: 1 — экспонирование, 2 — проявление, 3 — фиксирование [6]. Процесс обесцвечивания, т.е. преобразование ФХ, имеющего полосу поглощения в видимой области спектра, в бесцветный фотопродукт (ФП) с полосой поглощения в УФ области происходит под воздействием актиничного излучения на этапе 1 и на этапе 3. На этапе 1 распределение интенсивности воздействующего излучения преобразуется в пространственное распределение молекул ФП; на этапе 3 неэкспонированные молекулы ФХ равномерно распределенные по объему среды на этапе 2, с помощью некогерентной засветки преобразуются в несветочувствительный фотопродукт. Преобразование ФХ в ФП, сопровождаемое изменением спектрального поглощения среды, приводит к изменению ее показателя преломления на величину $\Delta n^{ФХ/ФП}(\lambda)$ характеризующую фазовые изменения среды (в макромасштабе) после проведения полного цикла обработки, т.е.

$$\Delta n^{ФХ/ФП}(\lambda) = n_0^{ФП}(\lambda) - n_0^{ФХ}(\lambda),$$

где $n_0^{ФП}$ средний показатель преломления среды после полного преобразования ФХ в ФП; $n_0^{ФХ}$ — средний показатель преломления среды с ФХ в исходном состоянии до начала экспонирования.

Как показали теоретические расчеты, выполненные в работе [7], зависимость $\Delta n^{ФХ/ФП}(\lambda)$ имеет сложный характер: величина $\Delta n^{ФХ/ФП}$ в коротковолновой области видимого спектра отрицательна, в длинноволновой — положительна; в центральной области — переходит через нулевое значение. Такие изменения среднего показателя преломления среды необходимо учитывать при расчете условий эксплуатации высокоселективных ГОЭ с заданными параметрами.

В то же время имеющихся экспериментальных и теоретических данных явно недостаточно для оценки оптических параметров образцов ПММА/ФХ и их изменении: информация весьма ограничена, достаточно противоречива и получена в различных условиях, что затрудняет сравнительный анализ результатов [1]. Например, выполненные на хорошей экспериментальной базе измерения $\Delta n^{ФХ/ФП}$ методом интерференционной спектроскопии [8] относятся к ИК области спектра (1520–1570 нм); при этом в качестве воздействующего использовалось излучение 532 нм практически за пределами области поглощения ФХ.

Оценка фазовых изменений образцов, характеризующих величину $\Delta n^{ФХ/ФП}$ в условиях, которые реализуются в экспериментах по созданию реальных ГОЭ, является актуальной задачей в современных условиях, когда ассортимент объемных регистрирующих сред для записи информации весьма ограничен.

Объект и метод исследования

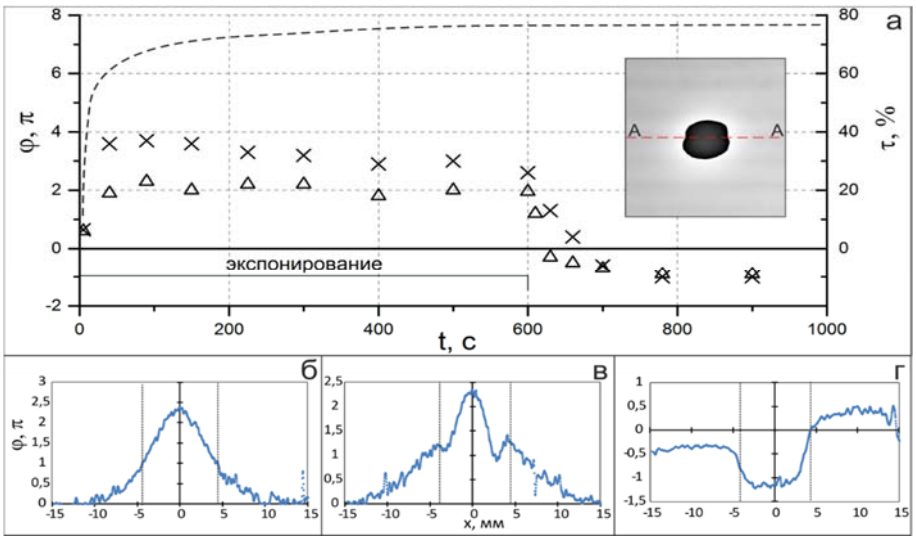
Объектом исследования являются образцы материала «Диффен», полученные по разработанной технологии [6] и обладающие стабильными и воспроизводимыми голографическими и физико-механическими характеристиками.

В качестве основного параметра рассмотрено изменение фазы излучения, тестирующего образец в процессе его экспонирования актиничным излучением и в постэкспозиционный период. В качестве актиничного было использовано излучение DPSS лазера с длиной волны 473 нм, что соответствует области спектральной чувствительности образцов ПММА/ФХ, широко используемой в экспериментах.

Фазовые измерения производились методом цифровой голографической интерферометрии (ЦГИ) на экспериментальном стенде [9] с длиной волны тестирующего излучения 532 нм. Цифровые голограммы регистрировались в течение всего времени наблюдения: до, во время и после экспонирования с интервалом в одну секунду. Цифровые интерферограммы получены путем сравнения текущей голограммы с голограммой исходного состояния образца. Результаты обработки такой интерферограммы представляют собой пространственное изменение фазы тестирующего излучения в текущий момент времени по сравнению с исходным состоянием образца. Изменение пропускания образца при его обесцвечивании контролировалось измерительным прибором.

Экспериментальные результаты и их анализ

На рис. 1а приведены зависимости изменения фазы тестирующего излучения и пропускания образца толщиной 2,7 мм в центре области экспонирования во время воздействия излучения и в постэкспозиционный период. Коллимированный пучок воздействующего излучения имел диаметр 8 мм с несколько размытыми краями; полученные интерферограммы (одна из них приведена на врезке рис. 1а) обладали круговой симметрией, пространственное распределение параметров измерялось по линии А–А в горизонтальном сечении.



а — изменение пропускания (штриховая кривая, мощность излучения 20 мВт) и фазы тестирующего излучения (532 нм) в центре экспонированной области при мощности излучения 20 мВт (Δ) и 30 мВт (×), на врезке — вид цифровой интерферограммы в момент времени 70 с; б, в, г — распределение фазы тестирующего излучения по площади образца в сечении А–А при воздействии излучения 473 нм (б — 10 с; в — 50 с) и в постэкспозиционный период (г — 890 с)

Рис. 1. Изменение оптических характеристик образца материала Диффен за время наблюдения в процессе экспонирования излучением 473 нм и в постэкспозиционный период

Пропускание образца в процессе воздействия излучения 473 нм мощностью 20 мВт (рис. 1а, штриховая линия) имеет типичный вид: резкое увеличение пропускания в начальный период воздействия 0–50 с и достижение стабильного состояния ($\tau \approx 80\%$), которое практически не изменяется при дальнейшем воздействии, т.к. преобразование ФХ в ФП прошло полностью. В начальный период воздействия также происходит резкое увеличение фазы φ до его максимального значения, которое зависит от мощности воздействующего излучения и толщины образца. Далее значение фазы выходит на стабильный уровень, который при определенных условиях может быть ниже максимального значения — небольшое снижение фазы после достижения максимального значения можно наблюдать на зависимости $\varphi(t)$ при увеличении мощности до 30 мВт (рис. 1а). Чрезвычайно интересной особенностью зависимости $\varphi(t)$ является то, что при снятии воздействия фаза уменьшается и достигает постоянного отрицательного значения $-\varphi_{п/э}$.

Изменение фазы на этапе воздействия излучения обуславливают два основных процесса: фотоокисление ФХ (квантовый выход ≈50% [10]) и нагрев образца за счет поглощения энергии. В постэкспозиционный период нагрев образца отсутствует, и изменение фазы в этот период по сравнению с исходным состоянием образца обусловлено именно фотообесцвечиванием. Приведенные на рис. 1б, в, г пространственные распределения фазы в сечении А–А свидетельствуют об этом: в постэкспозиционный период пространственное изменение фазы уверенно диагностируется только в области экспонирования (рис. 1г) в отличие от аналогичной зависимости во время экспонирования (рис. 1б, 1в).

Результаты обработки цифровых интерферограмм, полученных на этапе постэкспозиционного стабильного состояния образца в ряде экспериментов, приведены в таблице.

Табл. 1. Изменение фазы тестирующего излучения (532 нм), прошедшего образец в постэкспозиционный период (рис. 1а, 850–900 с) в центре области экспонирования излучением 473 нм с различной плотностью мощности

№ эксперимента	Мощность излучения, мВт (473 нм)	Плотность мощности, мВт/см^2	Изменение фазы, $\varphi_{п/э}$ (532 нм)
1	21	33	$-1{,}15\pm0{,}04\,\pi$
2	33	42	$-0{,}85\pm0{,}08\,\pi$
3	36	1146	$-1{,}06\pm0{,}07\,\pi$

Искомый набор интерферограмм формировался из интервала времени наблюдения 850–900 с (рис. 1а) трех серий экспериментов с различными условиями экспонирования: из набора 50 интерферограмм было выбрано 10 типичных кадров-интерферограмм (рис. 1г); произведена их обработка; определено среднее значение $\varphi_{п/э}$ и его погрешность. Значения $\varphi_{п/э}$ соответствуют изменению фазы тестирующего излучения в стабильный постэкспозиционный период по сравнению с исходным состоянием образца до начала экспонирования.

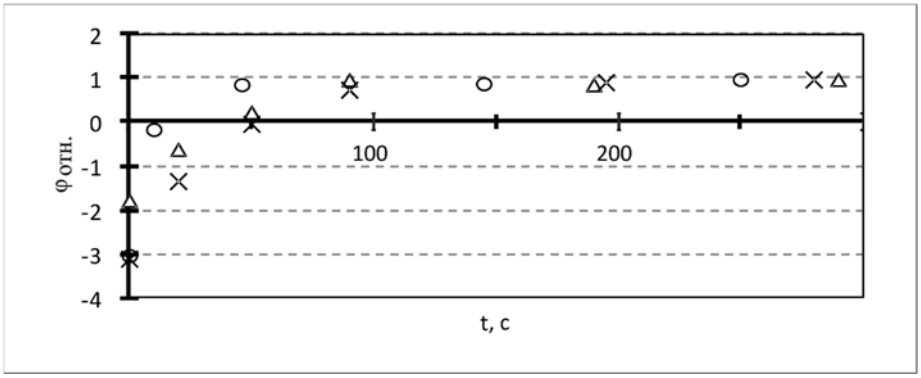


Рис. 2. Динамика изменений фазы тестирующего излучения (532 нм) в центре области экспонирования в постэкспозиционный период для экспериментов 1(Δ), 2(×), 3(○) (см. таблицу) с различной плотностью мощности излучения; $\varphi_{отн}(t) = \varphi(t)/\varphi_{п/э}$

На рис. 2 представлена постэкспозиционная динамика изменения фазы тестирующего излучения в проведенных экспериментах. Зависимость $\varphi_{отн}(t) = \varphi(t)/\varphi_{п/э}$ демонстрирует важные особенности поведения фазы на постэкспозиционном этапе: изменение знака фазы происходит через 70–100 с, а достижение постоянного значения через 150–200 с после окончания экспонирования.

Таким образом, полученные экспериментальные данные (табл. 1) показывают, что фаза обесцвеченного образца, определенная по сравнению с его исходным состоянием, практически не зависит от плотности мощности воздействующего излучения в исследуемом диапазоне и составляет величину $\varphi_{п/э} = -1{,}02 \pm 0{,}15\,\pi$. (Следует отметить, что при изменении плотности мощности в 40 раз изменение фазы не превышает 15%).

Заключение

Проведены количественные оценки изменения фазовых характеристик образца полимерной регистрирующей среды на основе фенантренхинона, обусловленных фотохимическими процессами под воздействием актиничного излучения с длиной волны 473 нм. Показано, что при полном обесцвечивании независимо от плотности мощности воздействующего излучения фаза тестирующего излучения с длиной волны 532 нм изменяется на величину $-3{,}2 \pm 0{,}5$ радиан по сравнению с исходным состоянием образца до начала его экспонирования. В предположении неизменности толщины образца в данном процессе изменение его показателя преломления составляет величину $\Delta n^{ФХ/ФП} = -(1{,}02 \pm 0{,}15) \cdot 10^{-4}$.

При сравнении этого значения с результатами, полученными в работе [8] при длине волны 1,5 мкм $\Delta n^{ФХ/ФП} = +4{,}3 \cdot 10^{-5}$, можно констатировать, что ход зависимости $\Delta n^{ФХ/ФП}(\lambda)$ для образцов ПММА/ФХ качественно соответствует теоретическим расчетам работы [7], а изменение знака фазы происходит в спектральной области $\lambda > 530$ нм.

Авторы благодарят О.В. Бандюк за изготовление образцов и обсуждение результатов.

Источники

[1] Вениаминов А.В., Могильный В.В. // Опт. и спектр. — 2013. — Том 115. — №6. — С. 1014.
[2] Shelby R.M. // SPIE Proc. — 2002. — Vol. 4659. — P. 344–360.
[3] Steckman G.J., Solomatine I., Zhou G., Psaltis D. // Opt. Lett. — 1998. — Vol. 23. — №13. — P. 1310–1312.
[4] Lin S.H., Hsu K.Y., Chen W., Whang W.T. // Opt. Lett. — 2000. — Vol. 25. — №7. — P. 451–453.
[5] Hemmer P. // Holography for the New Millenium / P. Hemmer, S. Shahriar, J. Ludman, H.J. Caulfield; ed. by J. Ludman., H.J. Caulfield, J. Riccobono. — N.Y.: Springer, 2002. — P. 179.

[6] Андреева О.В., Бандюк О.В., Парамонов А.А., Черкасов А.С., Гаврилюк Е.Р., Андреев П. В. // Оптический журнал. — 2000. – Том 67. — №12. — С. 27–33.
[7] Вениаминов А.В. Диссертация. — 2012. — С. 124.
[8] Lumeau J., Lequime M. // Appl. Opt. — 2006. — Vol. 45. — №24. — P. 6099–6105
[9] Манухин Б.Г., Гусев М.Е., Кучер Д.А., Чивилихин С.А., Андреева О.В. // Опт. и спек. — 2015. — Том 119. — №3. — С. 64–69.
[10] Бандюк О.В., Шелехов Н.С., Попов А.П., Данилова М.Я. // Журнал прикладной химии. — 1988. — №4. — С. 946–948.

Peculiarities of the exposure of radiation on polymeric material "Difphen"

O.V. Andreeva, B.G. Manukhin, D.A. Moseyko, N.V. Andreeva
Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

Introduction

Polymeric recording media with the thickness of the order of millimeter are used at the present time for scientific purposes and for the creation of highly selective holographic optical elements (HOE), for recording and archival storage of information. [1–5]. One of the most promising practically realizable materials for recording volume holograms are polymeric media with diffusion enhancement based on polymethyl methacrylate (PMMA) and phenanthrenequinone (PQ). Such materials are characterized by high resolution capability and information capacity of the samples in combination with available technology of their production. Their disadvantages include the fact that the change of physico-mechanical characteristics of polymer samples and their optical parameters during changing external conditions (including temperature and humidity) is significantly higher than other optical materials such as silicate glass or optical crystals.

Changes of parameters of the sample due to increase of its temperature should be taken into account when considering the recording process of the hologram, because the effect of actinic radiation (radiation with a wavelength in the spectral region of absorption of the sample) is accompanied by heating which leads to the change of the average refractive index and the thickness of the sample.

Thus, during recording of the hologram under the influence of the interferential field on the spatial-modulated changes of the optical characteristics of the sample (photoinduced changes) are superimposed spatial-unmodulated changes of its optical characteristics caused by heating.

If temperature changes of the refractive index of the sample are comparable with the amplitude of the photoinduced changes, this can lead to the fact that the spatial structure of recorded hologram will be different from the structure of the recorded interferential field. The accounting of such deformations, as well as optimization of the recording conditions to reduce thermal effects is particularly important in obtaining volume holograms designed for the creation of highly selective HOE. The available literature information about the effect of influence of temperature changes on parameters of recorded polymeric holograms is ambiguous, and often contradictory, as it refers to samples obtained in different conditions [1].

Object and methods

Object of research: sample of material "Difphen" — one of the modifications of polymeric volume recording medium with diffusion enhancement based on PMMA/PQ [6]. For research of changes of optical characteristics of the sample in the process of radiation exposure and post-

exposure period was used experimental stand designed for the research of phase transformations in transparent objects by method of digital holographic interferometry (DHI) [9], The sample (disk with diameter 40 mm) is rigidly mounted in a special cassette and installed in the object beam in accordance with the optical scheme of interferometric experiment. The object beam of interferometer is a non-actinic test beam for this sample of radiation of 532 nm, which tests a workspace of the sample with the size not less than 25×25 mm. The beam of actinic radiation, extended by lens, passes through the sample in the center of workspace. This stand has a computer terminal to control registration of sequence of digital holograms and for their further processing.

The methodology of each experiment includes the following main stages [9]:

- recording of the sequence of digital holograms that show the current state of the sample during the experiment: before radiation exposure (the initial state), during the period of exposure (exposure) and in post-exposure period (relaxation);
- receiving a series of digital interferograms by processing sampling of recorded holograms;
- digital processing of interferograms and presentation of results in a convenient way.

Conclusions

The experiments with the use of the method developed by authors allowed quantifying the phase change of the sample of polymeric recording medium “Difphen” during exposure of actinic radiation of 473 nm.

It is shown that irreversible changes of the sample with the thickness of 2.7 mm under exposure of radiation of 473 nm with power 20–36 mW at full transformation of PQ into PP is characterized by the negative phase difference of testing radiation of 532 nm with a value of $1{,}0\pm0{,}1\,\pi$ radian. The value of reversible changes, which due to thermal effects, is characterized by the positive phase difference of testing radiation of 532 nm which is estimated be the value $\approx3\pi$ radian.

Thus, at these experimental conditions reversible changes of optical characteristics of a polymeric sample, that accompany the process of exposure of actinic radiation, greatly exceed irreversible changes that provide recording holographic information.

Perhaps these facts explain the failure of some experiments carried out before, including the authors, on recording of high selective reflective holograms on samples of polymeric medium with diffusional amplification.

To reduce distorting influence of thermal effects during holographic recording it is necessary to choose conditions of the experiment associated with the increase of influence of phototransformation of PQ (selection of optimal working wavelength) and for reduce the influence of thermal effects (wavelength and power of exposed radiation, duration of exposure and etc.

3.3 Интерференционные явления в метализированном анодированном алюминии и варианты их применения

В.В. Шелковников, Г.А. Любас, С.В. Коротаев
Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Введение

Анодированный оксид алюминия (АОА) привлекает внимание исследователей, благодаря своей нанопористой природе. Высокая адсорбционная способность анодированного алюминия, пористая структура плоской поверхности, возможность контроля толщины анодированного слоя позволяют делать на его основе чувствительные интерференционные сенсоры органических веществ и использовать особенности в спектрах интерференционного отражения в качестве элементов защиты. Создание материалов, обладающих селективностью отражения, сенсорной чувствительностью, включая материалы для оптических химических сенсоров и для защиты ценных бумаг, является актуальной задачей современного материаловедения [1–4].

Сенсорные свойства дважды металлизированного анодированного алюминия.

При образовании плёнки анодированного алюминия на алюминиевой подложке в спектрах отражения возникает интерференционная структура RIFS (Спектры отражательной интерференции — RIFS — reflection interference spectra), в которой количество и положение максимумов зависят от толщины и показателя преломления плёнки. Показано, что усиление контраста RIFS достигается сочетанием последовательного электрохимического осаждения меди и химического осаждения наночастиц благородных металлов (Ag, Au) на анодированную поверхность алюминия как показано на рис. 1. Эффект объяснен образованием структуры ОАО аналогичной интерферометру Фабри — Перо. RIFS металлизированных плёнок АОА были измерены и эффективный показатель преломления и толщина выбранной плёнки АОА были рассчитаны на основании условий оптической интерференции.

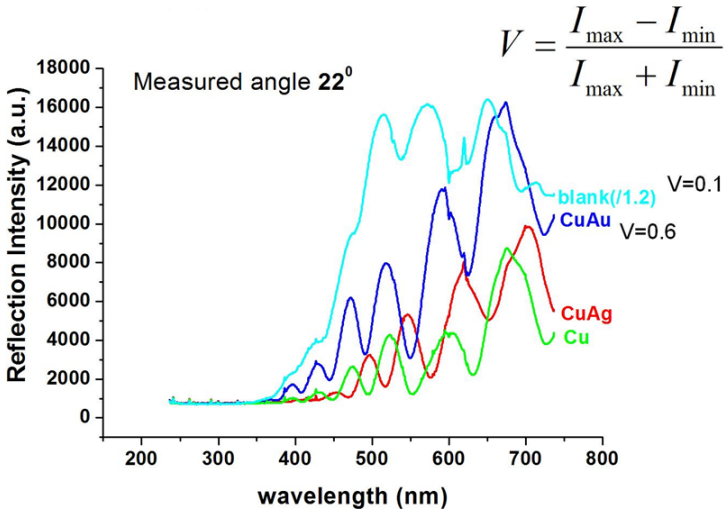


Рис. 1. Эффект усиления спектров интерференционного отражения АОА при дополнительном химическом осаждении благородного металла

Адсорбция вещества аналита внутри пор сдвигает интерференционные пики, что дает возможность обнаруживать малые количества вещества. Оптические химические сенсоры не

чувствительны к электромагнитным и радиационным полям, и имеют невысокую стоимость. Для ряда аналитов показано влияние химического осаждения наночастиц благородных металлов (Au, Ag) на увеличение сенсорной чувствительности плёнок АОА.

Чистые плёнки оксида алюминия (толщиной около ≈1 мкм) обладают слабой оптической сенсорной чувствительностью к органическим веществам. Наоборот, плёнки АОА, содержащие на поверхности наночастицы благородных металлов высокочувствительны к определенным органическим соединениям вследствие усиления сдвигов RIFS. На примере глюкозы показано, что введение наночастиц благородных металлов приводит увеличению чувствительности сенсора на основе АОА в 5–6 раз, что позволяет определить $\approx 10^{-8}$ г исследуемого вещества. Изменение RIFS при адсорбции глюкозы приведены на рис. 2.

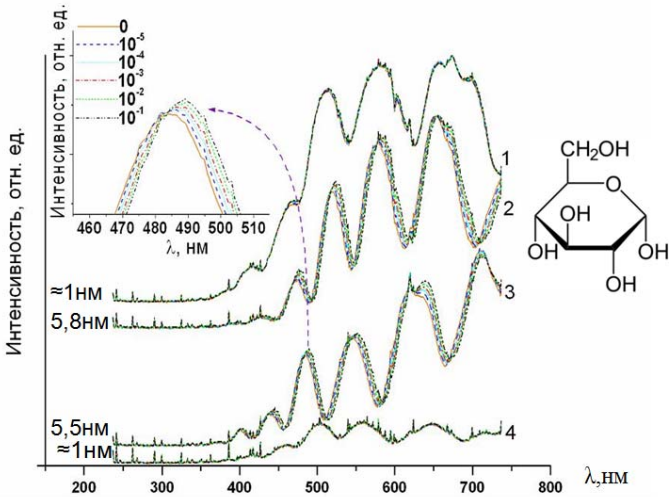


Рис. 2. Спектры отражения пористых алюминиевых оксидных пленок (1), содержащих наночастицы золота (2), серебра (3), меди (4) для разной концентрации (от 10^{-5} до 10^{-1} моль/литр) глюкозы

Отражающие пленки анодированного алюминия с защитной функцией

Создание новых технологий и материалов, обладающих селективностью отражения, является актуальной задачей в области защиты ценных бумаг. Определенные методы анодирования алюминия позволяют создать многослойную структуру АОА, демонстрирующую сложную интерференционную картину с узкими пиками RIFS, как показано на рис. 3.

В этом случае пленка АОА с RIFS может быть использована как защитный признак. Последовательное анодирование алюминия в различных анодных ваннах приводит к модуляции RIFS которая может выполнять функцию случайного интерференционного штрих-кода. Считывание спектрального штрих-кода кода не зависит от перистрофического положения образца. Модулированный RIFS защитной области может быть сопоставлен с реперным образцом для получения совпадения интерференционных пиков. Дополнительно к модуляции в спектрах RIFS АОА наблюдается изменение соотношения пиков при измерении в отраженном свете с различной (s, p)-поляризацией. Поляризационный дихроизм RIFS АОА может являться дополнительным признаком контрафактой защиты.

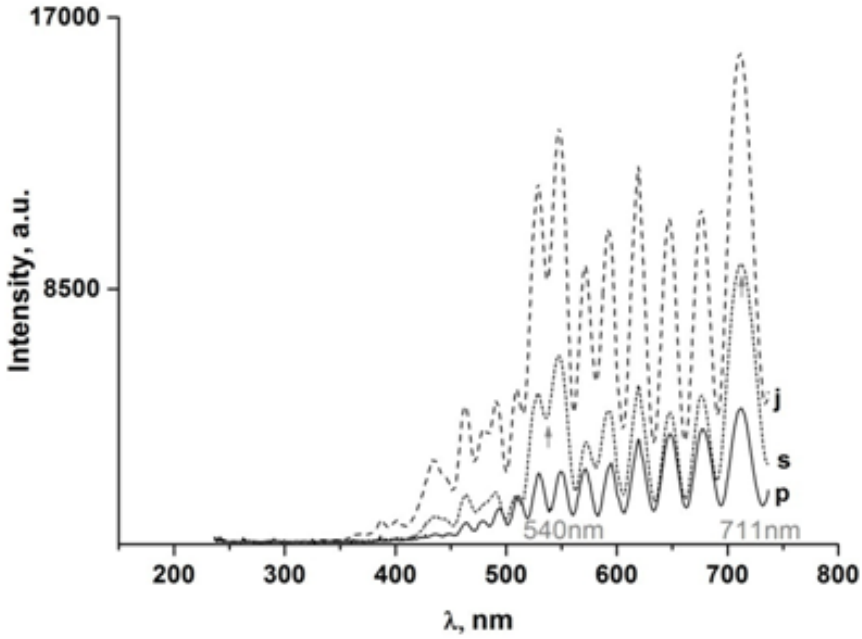


Рис. 3. RIFS пленки АОА анодированной в различных ваннах без поляризации и при s, p поляризации отраженного света

Источники

[1] Шмидт Д. Оптоэлектронные сенсорные системы / Д. Шмидт, А. Шварц. — М.: Мир, 1991.
[2] Gauglitz G. Direct Optical Sensors: Principles and Selected Applications // Anal. Bioanal. Chem. — 2005. — Vol. 381. — P. 141–155.
[3] Zhang D. In-situ thickness measurement of porous alumina by atomic force microscopy and the reflectance wavelength measurement from 400–1000 nm / D. Zhang, H. Zhang, Y. He // Microscopy Research and Technique. — 2006. — Vol. 69. — P. 267–270.
[4] Alvarez S.D. A Label-Free Porous Alumina Interferometric Immunosensor / S.D. Alvarez, C.-P. Li, C.E. Chiang, I.K. Schuller, M.J. Sailor // ACSNano. — 2009. — Vol. 3. — №10. — P. 3301–3307.
[5] Macias G. Gold-coated ordered nanoporous anodic alumina bilayers for future label-free interferometric biosensors / G. Macias, L.P. Hernández-Eguía, J. Ferré-Borrull, J. Pallares, L.F. Marsal // ACS Appl. Mater. Interfaces. — 2013. — Vol. 5. — P. 8093–8098.

Interferometric phenomena in the anodized aluminum and variants of their application

V.V. Shelkovnikov, G.A. Lyubas, S.V. Korotaev
Vorozhtsov Novosibirsk institute of organic chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The effect of selective color reflection enhancement from a double metalized nanoporous anodic alumina (NAA) film surface under proper conditions of electrochemical and chemical metal (Cu–Ag, Cu–Au) deposition has been observed. Selective coloration of the NAA films with high index of the reflection and wide range of the color tones was achieved. The additional chemical deposition of the noble metal leads to the enhancement of the selective reflection ability and the interference contrast of the reflected light. The distribution of the chemically deposited silver nanoparticles on the top surface of electrochemically copper metalized pores of anodized aluminum has been shown by the electron microscopy method. The optical reflection (RIfS) spectra at

different angles (10°–85°) of metalized NAA film have been measured, and the effective index of refraction and film thickness have been calculated. The effect of the reflected light interference contrast enhancement has been explained as being a result of the more effective separation of the two reflecting surfaces air/Al_2O_3 in the structure of the film similar to a Fabry — Perot interferometer. The influence of chemical deposition of gold and silver on the sensory sensitivity of the films of nanoporous anodized aluminum oxide was studied. It is found that thin (≈1 μm) porous oxide films containing nanoparticles of noble metals are highly sensitive to organic compounds in contrast to the blank porous films. It is established that the films possess selectivity of the spectral shift in interference modulated spectrum of the reflected light to designated substances and exhibit large values of the spectral shifts in the coating solutions of glucose and ethanol.

The obtained RIfS in the form of random reflection interferention are useful for high protection-securities as the barcode label. For this purpose, the multilayer structures of AOA was obtained and modulation of RIfS was achieved.

3.4 Введение в иконику изобразительных голограмм. Воспроизведение цвета

А.И. Шварцвальд
Университет города Переславля им. А.К. Айламазяна, Переславль-Залесский, Россия

Проанализирована проблема воспроизведения цвета на всех стадиях голографического процесса с использованием принципов иконики.

Задача иконики изобразительных голограмм — изучение общих свойств голографических изображений с учётом специфики зрительного восприятия, установление правил изготовления и наблюдения голограмм, обеспечивающих полное и комфортное наблюдение объёмного изображения.

Исследован способ изготовления изобразительных голограмм Денисюка, который отличается использованием толстых прозрачных фотографических слоёв и встречных пучков при записи голограмм, образованием селективных голографических зеркал в слое голограммы и возможностью восстановления объёмного изображения дневным светом.

Одна из главных задач цветной голографии — обеспечить максимальное соответствие цвета изображения, формируемого голограммой, цвету реального объекта, освещённого дневным светом. Это особенно важно относительно голограмм исторических объектов, художественных произведений и портретов людей.

Процесс голографического воспроизведения цвета состоит из следующих взаимосвязанных стадий: освещение голографируемого объекта светом лазеров, выбор фотоматериала, экспонирование цветного объёмного изображения, химико-фотографическая обработка, освещение и рассматривание голограммы.

Восприятие цветного изображения органом зрения

Орган зрения, реагируя на попадающие в него фотоны с различной энергией (длиной волны) видимого диапазона света, преобразует информацию об интенсивности потока фотонов различной энергии в информацию цвета. Сетчатка глазного дна, на которой создаётся сфокусированное цветное изображение, содержит три сорта колбочек с различным светочувствительными веществами, которые при поглощении фотонов определённого диапазона энергии в результате фотохимической реакции создают электрические импульсы. У каждого вещества колбочек свой диапазон энергий фотонов. Эти диапазоны частично перекрываются. Имеются участки диапазонов, в которых фотоны одинаковой энергии вызывают реакцию в двух, и даже трёх сортах колбочек. Фотоны создают одинаковый электрический импульс, не зависимо от их энергии и вещества колбочек.

У фотонов различной энергии различный квантовый выход фотохимической реакции. Вследствие этого при воздействии одного вида фотонов на колбочку относительная интенсивность потока фотонов и потока электрических импульсов соответствует энергии фотона. В каждой триаде разноцветных колбочек генерируются сигналы с различной интенсивностью потока. Различие интенсивности этих потоков система зрения воспринимает как цвет.

Создание и наблюдение цветного голографического изображения при записи одноцветным лазером

Луч лазера — поток моноэнергетических фотонов. Интенсивность потоков фотонов, отражённых поверхностью объекта, зависит от отражательной способности участков

поверхности. В зоне совмещения объектного потока с опорным образуется интерференционная картина стоячих волн, обладающих максимумом и минимумом интенсивности $-I_{макс}$ и $I_{мин}$. Глубина модуляции оценивается параметром видности V, введённым Майкельсоном,

$$V = (I_{макс} - I_{мин}) / (I_{макс} + I_{мин}).$$

Картина интерференции, наряду с информацией о положении точек поверхности объекта в пространстве, содержит информацию об интенсивности объектного потока, отражённого соответствующей точкой поверхности объекта. Если участки поверхности объекта изменяют поляризацию отражённого света, происходит ослабление отражённого света, глубина модуляции уменьшается.

Интерференционная картина регистрируется в светочувствительном слое, который после химико-фотографической обработки становится голограммой объекта. Голограмма — набор систем селективных зеркал, отражающих поток фотонов определённой энергии. Эффективность отражения зависит от видности картины интерференции, характеризуется параметром «дифракционная эффективность» (ДЭ). Вследствие несовершенства регистрирующего материала системы селективных зеркал также несовершенны, отражательная способность зеркал распространяется на некоторую область спектра около максимума интенсивности потока отражённых фотонов. Положение максимума зависит от усадки фотослоя в процессе химфотообработки. Регулируя усадку фотослоя, можно обеспечить сдвиг спектра восстановленного изображения в коротковолновом или длинноволновом направлении, или обеспечить нулевую усадку. В последнем случае положение максимума ДЭ соответствует длине волны фотонов лазера.

Таким образом, в глазу наблюдателя формируется основной сигнал и цветной шум, который воспринимается как величина квантового выхода фотона определённой энергии и соответствующий ей цвет.

В процессе восстановления изображения объекта посредством освещения белым светом происходит селективное отражение потоков фотонов в соответствии со значением ДЭ участков голограммы. Поток фотонов, отражённый голограммой, не является монохроматическим, ширина спектра зависит от типа и свойств регистрирующего фотоматериала. Спектр ДЭ может частично попасть в диапазон соседнего спектра колбочки, что вызовет оптическое смешение цветов. В глаз наблюдателя попадают фотоны, которые воздействуют на колбочки соответствующего вида. Система зрения наряду с основным цветом «видит» цвета, отсутствующие в потоках, отражённых поверхностью объекта. Глаз воспринимает спектр интенсивности как цвет поверхности объекта в конкретной точке, т.е. формирует ложное цветное изображение (за исключением точки максимума ДЭ при нулевой усадке). Наличие цветного шума наряду со сдвигом максимума ДЭ используется в изобразительной голографии для создания более комфортных условий наблюдения моноцветных голограмм.

При записи моноцветных голограмм, основные помехи точному воспроизведению цвета: изменение поляризации отражённого потока фотонов, недостаточная ДЭ фотоматериалов, сдвиг максимума ДЭ в результате усадки фотослоя при химфотообработке, цветной шум, как следствие несовершенства фотоматериала.

Создание и наблюдение цветного голографического изображения при записи триадой лазеров

Оптимальная триада лазеров должна обеспечить совпадение максимумов дифракционной эффективности голограммы с максимумами светочувствительности пигментов колбочек. Такое совпадение может быть достигнуто использованием триады лазеров со

значениями длин волн, соответствующих максимумам квантовых выходов фотохимических реакций пигментов колбочек: 443, 544 и 570 нм. В этом случае требуется нулевая усадка фотослоя в процессе химфотообработки. Второй способ достижения требуемого совпадения — учёт стандартного значения усадки конкретного голографического фотоматериала в условиях стандартного режима химфотообработки. Длины волн триады лазеров не должны попарно быть дополнительными и образовывать ахроматический цвет.

Трудность в подборе оптимальной триады лазеров заключается в отсутствии промышленного изготовления необходимых лазеров. Проблема может быть решена использованием лазеров с перестраиваемой частотой. Подбор триады лазеров из числа изготовляемых также возможен, но не оптимален с точки зрения согласования со свойствами зрительной системы.

При освещении объекта тремя лазерами спектр отражённого света участками поверхности объекта отличается от спектра, отраженного при освещении дневным светом, отсутствующие цвета не создают свои структуры в голограмме и не содержатся в спектре восстановленного изображения объекта. Это неустранимый недостаток воспроизведения цвета многоцветными голограммами.

Требования к регистрирующему материалу: 1) Максимальная ДЭ для цвета каждого лазера (в идеале 100%), что желательно также и для воспроизведения объёмного изображения. 2) Минимальная полуширина кривой зависимости «ДЭ — длина волны восстанавливающего света» для цвета каждого лазера. Вероятно, увеличение максимальной ДЭ вызывает уменьшение ширины. Эти характеристики зависят от типа материала, эффективности режима химфотообработки и определяют совершенство системы селективных зеркал голограммы. 3) Возможность регулирования и стандартизации усадки фотослоя при химико-фотографической обработке.

Рассмотрены свойства некоторых голографических материалов относительно цветовоспроизведения. Оценена их применимость для цветной голографии по способу Денисюка. Намечены пути усовершенствования фотоматериалов.

Выводы

1. Голографический процесс с использованием триады лазеров принципиально не обеспечивает точное воспроизведение цвета поверхности объекта вследствие различия спектров отражения дневного света и лазерного освещения. Это непреодолимый недостаток воспроизведения цвета объекта.

2. Изменение поляризации света, отражённого поверхностью объекта, частично устраняется при использовании света с круговой поляризацией или полностью — применением краски, не изменяющей поляризации света.

3. Увеличение ДЭ фотоматериала для всех длин волн триады лазеров и уменьшение ширины спектров цветного шума можно достичь путём применения новых материалов и усовершенствования характеристик используемых материалов.

4. Усадка фотослоёв в процессе химфотообработки должна быть регулируемой и воспроизводимой.

Introduction to ikonika of fine holograms. Color reproduction

A.I. Shvartzvald
University of pereslavl them A.K. Ajlamazâna, Pereslavl-Zalessky, Russia

The problem of color reproduction at all stages of the holographic process using the principles of ikonika is analyzed.

One of the main tasks of the colored graphic holography is to ensure maximum matching of image color formed by a hologram to the natural color of an object illuminated by daylight. This is particularly important regarding the holograms of historic objects, works of art and human portraits.

The method of making fine art Denisjuk holograms was researched. It is characterized by using of thick transparent photographic layers and oncoming bunches with hologram recording, selective forming of holographic mirrors in a hologram layer and possibility of restoring volume daylight images.

The properties of some holographic materials regarding color reproduction was considered.

Found

A holographic process using laser triads never provides any precise color reproduction of the surface color of an object due to the differences between the daylight reflect and laser illumination spectra. This is overpowering lack of the object color reproduction.

The change of the polarization of light reflected by the surface of the object reduces the depth of modulation interference fringes, which causes the decrease of the diffraction efficiency of holograms and color reproduction quality. This deficiency is partly eliminated when using light with circular polarization or with full polarization by applying paints that cannot change the polarization of light.

The increase of the diffraction efficiency of the photographic material for all wavelengths of the triad of lasers and the reduction of the width of the color noise spectra will lead to the significant improvements in the color reproduction. There is a need to improve the characteristics of the materials used or apply new materials.

It is very important for the photolayer shrinkage in the process of the chemical treatment of holograms to be regulated and reproducible

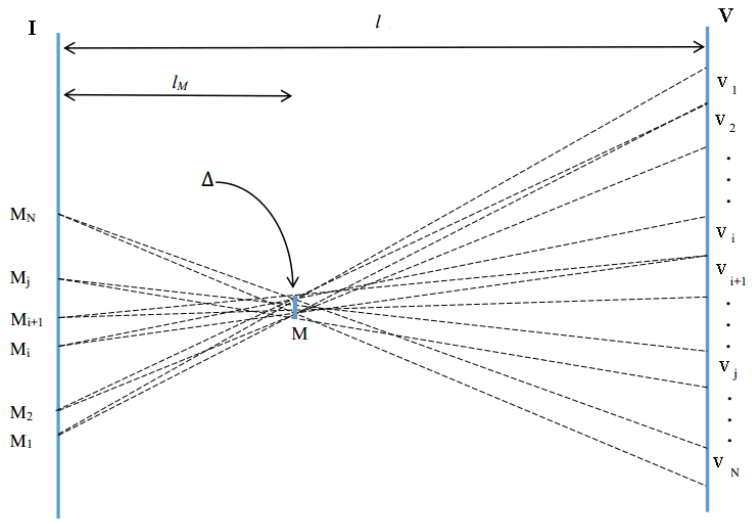
3.5 Исследование глубины пространства, воспроизводимого автостереоскопической многоракурсной системой

Ю.Н. Овечкис, А.И. Винокур
Московский государственный университет печати имени Ивана Федорова, Московка, Россия

Системы воспроизведения объемных изображения без применения очков и других специальных приспособлений всегда привлекали внимание и вызывали большой интерес, как у разработчиков, так и потребителей подобной техники. Подобные системы могут и частично уже используются в рекламе, телевидении, различных устройствах, на выставках и т.п. Достаточно широкое распространение среди них получили многоракурсные автостереоскопические устройства, формирующие объемные изображения только с горизонтальным изменением ракурсов. Для их создания используют линзорастровые [1–3] или голографические методы [4–6].

Не углубляясь в технологические подробности создания таких линзорастровых и стереоголографических изображений, отметим, что общим для них является формирование плоскости, в которой в закодированном виде сосредоточены изображения всех ракурсов демонстрируемого объекта, и плоскости зон раздельного видения этих ракурсов. Поскольку число ракурсов в таких устройствах ограничено, и чрезмерное его увеличение обычно связано с технологическими трудностями, представляется необходимым определить достаточное количество ракурсов, формируемых системой и связать его с глубиной воспроизводимого пространства.

Рассмотрим автостереоскопическую систему (рис. 1) с горизонтальным изменением ракурсов, формирующую в пространстве вертикальную плоскость их изображений I, а также вертикальную плоскость зоны видения V, состоящую из элементарных зон видения каждого ракурса V_i, представляющих собой вертикальные полосы шириной d. Ширина общей зоны видения $D = Nd$, где N — число ракурсов системы.



I — плоскость формирования ракурсов демонстрируемого автостереоскопического изображения, V — плоскость формирования зон видения этого изображения, M_1, M_2, ... M_N — изображения N ракурсов точки M стереоскопического изображения, наблюдаемого из одноракурсных зон видения V_1, V_2, ... V_N . l — расстояние между плоскостями I и V, l_M — расстояние от плоскости I до точки M наблюдаемого автостереоскопического изображения Δ — поперечный размер области перемещения стереоскопического изображения точки M при движении глаз в пределах одноракурсных зон видения.

Рис. 1. Обобщенная модель системы формирования автостереоскопического многоракурсного изображения

Предполагаем также, что система идеальная, т.е. границы зон видения достаточно резкие и не пересекаются. Стереоскопический образ некоторой точки M, находящейся в предэкранном пространстве, формируется точками $M_1, M_2, \ldots M_i, M_{i+1}, \ldots M_j \ldots M_N$ плоскости I.

Сначала рассмотрим случай, когда $d > b_{гл}$, где $b_{гл}$ — диаметр зрачка глаза, и оба глаза находятся внутри пары соответствующих глазному базису элементарных зон, например M_i и M_j. При неподвижном положении наблюдателя или при его небольшом смещении в пределах этой пары, он увидит обычное стереопарное изображение точки M. При перемещении глаз наблюдателя в соседние пары зон M_{i+1} и M_{j+1} появляются новые ракурсы, что обеспечивает возможность оглядывания предъявляемого объекта съемки.

Однако на границе элементарных зон происходит скачок изображения. Он обусловлен тем, что при смещении глаз внутри одной пары элементарных зон наблюдаемое стереоизображение перемещается параллельно плоскости I в пределах площадки Δ (рис. 1) от одного ее края в начале перемещения до другого в конце. При переходе в соседнюю пару зон изображение скачком возвращается в начальное положение.

Этот скачок тем больше, чем дальше изображение точки M находится от плоскости I формирования разноракурсных изображений и чем больше размер элементарных зон d (рис. 1). Нетрудно показать, что угловая величина β сдвига изображения относительно наблюдателя при оглядывании в пределах одной пары зон равна:

$$\beta = \Delta / (l \pm l_M) = d \cdot l_M / l \cdot (l \pm l_M), \qquad (1)$$

где l и l_M — расстояния от плоскости изображения ракурсов I до плоскости зон видения V и стереоскопического изображения M соответственно, знак «+» относится к изображению, расположенному за плоскостью I, знак «−» — перед ней по отношению к наблюдателю.

Если зрачок находится на границе двух зон, например, V_i, и V_{i+1} изображение будет двоиться, в глаз попадут одновременно два ракурса M_i и M_{i+1} (рис. 1). При этом угловой размер этого сдвоенного пятна, как нетрудно видеть, также определяется выражением (1).

Таким образом, накладывая естественное требование незаметности скачков и двоения при оглядывании многостереопарного (многоракурсного) изображения, потребуем, чтобы выполнялось условие $\beta < \beta_{гл}$, где $\beta_{гл}$ — угловое разрешение глаза наблюдателя. В результате получаем ограничение на допустимую глубину изображаемого пространства (для заданного размера элементарных зон видения):

$$l_M < \beta_{гл}\, l^2 / (d \pm \beta_{гл}\, l), \qquad (2)$$

где «−» относится к изображению, расположенному за плоскостью I, а «+» — перед ней.

Если размер элементарной зоны d в системе меньше диаметра зрачка, в глаз всегда будут попадать более одного изображения различных ракурсов. В этом случае для наблюдения единого достаточно резкого изображения данной точки ее максимальное удаление от плоскости фокусировки стереопары должно удовлетворять выражению (3), в котором размер элементарной зоны видения d заменен на диаметр зрачка $b_{гл}$:

$$l_M < \beta_{гл}\, l^2 / (b_{гл} \pm \beta_{гл}\, l), \qquad (3)$$

где «−» относится к изображению, расположенному за плоскостью I, а «+» — перед ней.

Данное выражение определяет максимальную глубину формируемого многоракурсного изображения с заданным разрешением ($\beta_{гл}$) при размере элементарной зоны видения, равном диаметру зрачка глаза. Необходимое число ракурсов при этом $N = D / b_{гл}$ и дальнейшее его увеличение, вообще говоря, не требуется. Здесь необходимо отметить, что если при создании системы допустить некоторую заметную размытость формируемого изображения, т.е. выйти за пределы $\beta_{гл}$, то чтобы устранить возникшее дробление картинки, целесообразно уменьшить поперечный размер элементарных зон видения по сравнению с диаметром зрачка глаза. При этом следует иметь в виду, что в реальных системах имеется ряд технологических факторов,

приводящих к ухудшению качества изображения — аберрации линз растра, хроматизм голограмм, протяженность источников света для их восстановления и пр., а вследствие этого упомянутое двоение будет отсутствовать.

Анализ выражения (3) показывает, что оно определяет не что иное, как глубину резкости глаза, расположенного в плоскости зон видения и сфокусированного на плоскость формирования стереопары. Т.е. максимальная глубина объемной сцены, формируемой многостереопарным методом при условии возможности ее непрерывного оглядывания, определяется глубиной резкости глаза наблюдателя. При этом уменьшение размеров элементарных зон видения и соответственно увеличение числа ракурсов не приводит к возможности увеличения глубины сцены при заданном критерии резкости $\beta_{гл}$.

Физический смысл такого ограничения объясняется тем, что в отличие от наблюдения реальных объектов или их голографических или оптических образов, в которых параллаксы меняются непрерывно в горизонтальном и вертикальном направлениях, и глаза имеют возможность аккомодироваться (фокусироваться) на разглядываемую точку, в случае стереоскопического предъявления с отсутствием вертикального параллакса глаза всегда сфокусированы на одну плоскость — плоскость формирования стереопар (плоскость *I* на рис. 1).

Проведенные в соответствии с изложенными выше соображениями расчеты показали хорошее соответствие с известными экспериментальными данными, как в части линзо-растровых изображений, так и стереоголографических.

Источники

[1] Валюс Н.А. Стереофотография. Стереокино. Стереотелевидение. — М.: Искусство, 1986.
[2] Elkhov V.A. A Modular Projection Autostereoscopic System for Stereo Cinema / V.A. Elkhov, N.V. Kodratiev, Y.N. Ovechkis, L.V. Pautova // Stereoscopic Displays and Applications XX. SPIE Proc. — 2009. — Vol. 7237. — P. 72370D.
[3] Van Berkel C. Multi-view LCD Display / C. van Berkel, D.W. Parker, A.R. Franklin // Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III. SPIE Proc. — 1996. — Vol. 2653. — P. 32–39.
[4] Баканас Р. Цифровая изобразительная голография для музеев / Р. Баканас, С. Захаровас // Мир Техники Кино. — 2011. — №22. — С. 20–21.
[5] Brothherton-Ratcliffe D. Large format digital Colour Holograms Produced using RGB Pulsed Laser Technology // 7th International Symhosion on Dissplay Holography. — 2006 — P. 200–209.
[6] Zacharovas S. Advances in Digital Holography // International Workshop on Holographic Memories Digests. — 2008. — P. 55–67.

The space depth formed by the multiview autostereoscopic system

Yu.N. Ovechkis, A.I. Vinokur
Moscow State University of Printing Arts, Moscow, Russia

The generalized model of a system for multi-view autostereoscopic image (lenticular [1–3] or stereo holography [4–5]) forming, is discussed in the report. It is shown that in the absence of changes of views in the vertical direction regardless of the number of generated horizontal views and sizes of the elementary zones of viewing, the depth of the space is limited. Analytical expressions for its determination are obtained and it is established that its value lies within the depth of sharpness of the observer's eye that focused at the plane of the views images forming. An explanation for this limitation is the impossibility of accommodation of the eyes of the observer on a given element of the image even when there is an infinitely large number of views in one (horizontal) direction.

References

[1] Values H. A., The Stereoscopic. Photography, Stereoscopic Cinema, Stereoscopic. Television, M.: Iskusstvo, 1986
[2] Elkhov V.A. A Modular Projection Autostereoscopic System for Stereo Cinema / V.A. Elkhov, N.V. Kodratiev, Y.N. Ovechkis, L.V. Pautova // Stereoscopic Displays and Applications XX. SPIE Proc. — 2009. — Vol. 7237 — P. 72370D.
[3] Van Berkel C. Multi-view LCD Display / C. van Berkel, D.W. Parker, A.R. Franklin // Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III. SPIE Proc. — 1996. — Vol. 2653. — P. 32–39.
[4] Bakanas R. Digital image holography for museums / R. Bakanas, S. Zacharovas // World of Technique of Cinema. — 2011. — №22. — P. 20–21.
[5] Brothherton-Ratcliffe D. Large format digital Colour Holograms Produced using RGB Pulsed Laser Technology // 7th International Symhosion on Dissplay Holography. — 2006. — P. 200–209.

Устные доклады
Секция №4

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

Oral presentations
Section №4

4.1 Контроль характеристик дифракционных оптических элементов в процессе изготовления

А.С. Конченко, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, В.Н. Хомутов, В.В. Черкашин
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

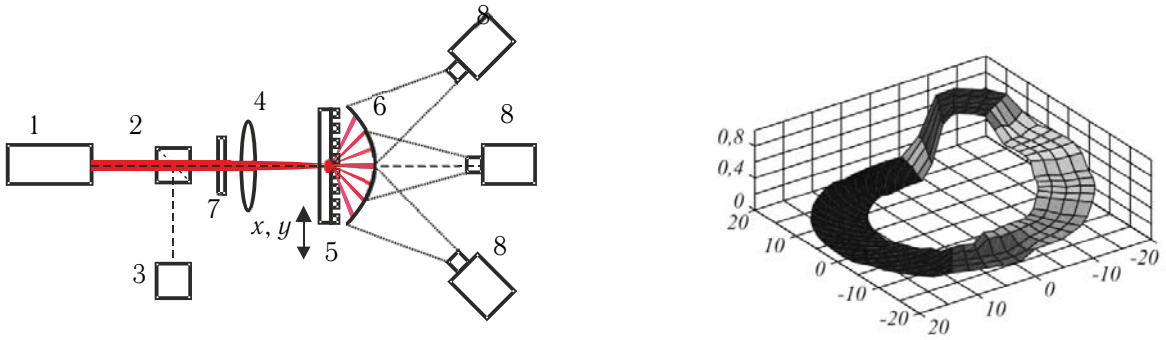
Введение

Во многих высокотехнологичных отраслях промышленности находят широкое применение дифракционные оптические элементы (ДОЭ), имеющие кусочно-непрерывный или ступенчатый поверхностный микрорельеф с глубиной до нескольких микрометров. Вопросы контроля ДОЭ стали весьма актуальны на современном этапе развития оптики, когда работа оптического элемента оценивается не только по соответствию заданному преобразованию световой волны, но и по соответствию жестким критериям его энергетической эффективности и малому светорассеянию.

В лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН разработаны различные неразрушающие методы характеризации ДОЭ с микрорельефом на промежуточных и финальной стадиях процесса изготовления. Одной из основных задач контроля ДОЭ является своевременное обнаружение неоднородностей характеристик микрорельефа на всей поверхности элемента. Для этого были разработаны сканирующие установки, позволяющие измерять карту важнейших характеристик ДОЭ — дифракционной эффективности и глубины микрорельефа.

Контроль дифракционной эффективности

Для точного контроля дифракционной эффективности (ДЭ) ДОЭ разработан автоматизированный сканирующий стенд [1]. Оптическая схема стенда показана на рис. 1а. Пучок света от лазерного модуля 1 фокусируется объективом 4 на поверхность исследуемого ДОЭ 5, образуя дифракционную картину на поверхности матового сферического экрана 6, где изображение фиксируется несколькими видеокамерами 8. Использование матового сферического экрана и нескольких видеокамер позволяет расширить возможную рабочую область и избежать потерь ДП. Сканирование поверхности происходит за счёт пошагового перемещения ДОЭ относительно лазерного пучка с помощью двухкоординатного моторизированного стола. В каждой точке измерения камеры передают изображения на управляющий компьютер, который производит их анализ, рассчитывает значения ДЭ для каждого видимого ДП и представляет результаты в виде карты распределения ДЭ рис. 1б. Часть излучения лазера с помощью светоделителя 2 направляется к фотоприёмнику 3 для контроля интенсивности лазерного модуля. Фазовая пластинка 7 вводится для вращения плоскости поляризации, когда необходимо исследовать влияние поляризации излучения на ДЭ ДОЭ.



а) б)

Рис. 1. Оптическая схема стенда для измерения ДЭ ДОЭ (а) и измеренная карта распределения ДЭ (б)

Сканирующий метод является специфическим бесконтактным методом для контроля ДЭ ДОЭ. Он позволяет контролировать на стадии амплитудного шаблона скважность периодической структуры ДОЭ по соотношению интенсивности дифракционных порядков, а на финальной стадии фазовой структуры позволяет получить карту распределения дифракционной эффективности, как в рабочем, так и паразитных порядках дифракции [2].

Контроль глубины травления фазовых бинарных синтезированных голограмм

Другим методом характеризации периодического поверхностного рельефа, является метод зеркальной спектроскопической рефлектометрии (ЗСР) [3]. Этот метод позволяет бесконтактно измерять глубину травления бинарного фазового рельефа дифракционных решеток [4]. Возможен и вариант метода с измерением на пропускание, но он не применим для матовых и непрозрачных подложек, и имеет существенно большую минимально измеряемую глубину.

При освещении решетки пучком белого света зависимость интенсивности отраженного пучка в нулевом порядке дифракции от волнового числа ($k = 1/\lambda$) имеет вид периодической функции. Локальные экстремумы интенсивности достигаются при условии:

$$k \cdot n(k) = \frac{m \cdot \cos(\alpha)}{4H},$$

где m — целое число полуволн, укладывающихся в оптической разности хода.

Определив положения экстремумов в спектре, можно вычислить глубину рельефа H по формуле:

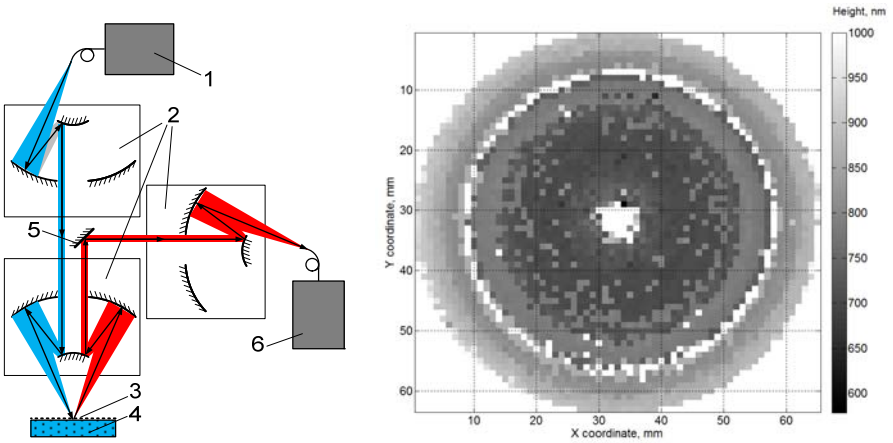
$$H = \frac{\cos\alpha}{4(N-1)} \sum_{i=1:N-1} \frac{1}{(k_i n_i - k_{i+1} n_{i+1})}, \quad (1)$$

где N — количество анализируемых экстремумов, n_i — коэффициент преломления подложки при волновом числе k_i. Коэффициент преломления введен в эту формулу для случая измерения через подложку.

На основе метода ЗСР была разработана сканирующая установка, позволяющая измерять карту глубин травления бинарного фазового рельефа по площади элемента размером до 200×200 мм и в диапазоне глубин от 240 до 3200 нм. Этот диапазон можно сдвинуть в область более мелких структур, проводя измерения через кварцевую подложку. Это позволяет увеличить эффективную фазовую глубину структуры и измерять глубину от 165 до 2200 нм.

Установка создана на основе волоконного спектрометра AvaSpec-ULS2048*16-UA-50 с диапазоном 200–1100 нм и волоконного источника света AvaLight-DH-S-DUV. Оптическая схема прибора, показанная на рис. 2а, включает 3 зеркальных объектива со следующими

параметрами: увеличение 15X, апертура 0,28, рабочий отрезок 24,5 мм. Выбор зеркальных объективов вызван отсутствием у них хроматических аберраций. Пучок от осветителя до измеряемой поверхности проходит с одной стороны от оси объектива, а отраженный с другой. Таким образом, эффективная апертура пучков снижается примерно в 3 раза.



а) б)

Рис. 2. Оптическая схема реализации установки ЗСР (а) и измеренная карта глубины (б).

Использование трех объективов и частичного заполнения апертуры обусловлено необходимостью фильтрации дифракционных порядков отличных от нулевого. Оптическая система переносит изображение торца волокна на исследуемую поверхность в масштабе 1:1 и затем на торец волокна спектрометра. В приборе были использованы волокна с диаметром сердцевины 100 мкм. При одностороннем прохождении пучков через объективы с апертурой 0,28 вариация углов падения лучей на исследуемую поверхность приводит к увеличению погрешности измерения на $\pm 2{,}5\%$. Глубина травления образца, представленного на рис. 2б составила 790 нм со стандартным отклонением 66,9 нм. Время измерение всей карты глубин составило около 17 мин и складывается главным образом из времени пошагового перемещения стола и времени накопления сигнала спектрометром. Достаточный уровень амплитуды сигнала достигался при времени интегрирования 80 мс. Применение более яркого источника света IRDC-XWS-65 [5] позволяет получить сигнал такой же амплитуды при времени интегрирования около 0,25 мс.

Заключение

Технологический цикл производства прецизионных ДОЭ требует обязательного промежуточного и выходного контроля параметров изделия. Структура ДОЭ может быть настолько сложной, что её контроль, существующими прямыми методами невозможен. Поэтому крайне важна разработка косвенных методов оценки параметров профиля ДОЭ непосредственно в процессе производства. За счёт последующей математической обработки результат этих измерений способен демонстрировать высокую точность.

Данная работа поддержана частично грантом РФФИ ОФИ-М № 4-29-07227 и междисциплинарным интеграционным проектом № 112 Сибирского отделения РАН.

Источники

[1] Хомутов В.Н. Измерение дифракционной эффективности ДОЭ по многим порядкам дифракции / В.Н. Хомутов, А.Г. Полещук, В.В. Черкашин // Компьютерная оптика. — 2011. — Том 35. — №2. — С. 196–202.

[2] Белоусов Д.А. Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой / Д.А. Белоусов, А.Г. Полещук, В.Н. Хомутов // Компьютерная оптика. — 2015. — Том 39. — №5. — С. 678–687
[3] Xinhui. Specular Spectroscopic Scatterometry / Xinhui, J. Nickhil, B. Junwei, C.J. Spanos // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. — 2001. — 14(2). — P. 97–111.
[4] Корольков В.П. Спектрофотометрический метод измерения глубины отражательных калибровочных решеток / В.П. Корольков, А.С. Конченко // Автометрия. — 2012. — Том 48. — №2. — С. 119–127.
[5] Троицкий исследовательский центр / URL: http://troitskscientific.com/xws-65.html (дата обращения 30.05.2016).

Measurement of characteristics of diffractive optical elements in the manufacturing process

A.S. Konchenko, V.P. Korolkov, A.G. Poleshchuk, V.N. Khomutov, V.V. Cherkashin
Institute of Automation and Electrometry, Siberian branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Results of development of some methods of non-destructive characterization of diffractive optical elements at intermediate and final stages of their production made in the laboratory of diffractive optics of Institute of Automation and Electrometry SB RAS are presented.

4.2 Дифракционные оптические элементы с двойной функциональностью в изображающих гиперспектрометрах

В.А. Бланк, Р.В. Скиданов
Институт систем обработки изображений РАН — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Самара, Россия
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Введение

В последнее время интенсивно растет количество областей применения изображающих спектрометров, они используются в медицине, ДЗЗ, сельском хозяйстве, военном деле и т.д. [1]. Вследствие этого, возникает необходимость в разработке экономически эффективных и миниатюрных спектрометров. До сих пор традиционные оптические спектрометры были, как правило, громоздкими и дорогостоящими. В идеальном случае гиперспектрометр должен умешать в мобильные устройства

Предпринимались различные усилия для решения этой проблемы. Стали использовать вогнутые решетки [2] и дифракционные линзы [3, 4]. Однако подход к миниатюризации гиперспектрометра описанный в [2] подходит для использования в бортовой аппаратуре для авиации и космической техники, однако из-за сложности оптической схемы дальнейшая миниатюризация трудновыполнима. Подход описанный в [3] связан с высокой сложностью алгоритмов обработки полученной информации, и часто не позволяет получить достаточное спектральное разрешение. Наиболее удачное решение предложено в [5], где использовался ДОЭ, сочетающий в себе свойства линзы и дифракционной решетки [5]. В этом случае вся оптическая схема изображающего спектрометра сводится к этому элементу и ПЗС матрице. Однако предложенный подход можно еще более усовершенствовать. В работе [5] дифракционная линза была сформирована на одной стороне стеклянной пластины, а дифракционная решетка на другой.

В данной работе предлагается ДОЭ, микрорельеф которого представляет собой суперпозицию микрорельефов дифракционной линзы и дифракционной решетки.

Спектрометр на основе линзы-решетки

В работах [6, 7] исследовался элемент, состоящий из дифракционной решетки и линзы, которые изготавливались отдельно друг от друга. В нашей работе был изготовлен элемент, который совмещает два рельефа: дифракционной решетки и линзы. Такой подход имеет несколько основных преимуществ перед [5]:

- меньше аберрационных искажений от дифракционной решетки;
- меньшая стоимость базового ДОЭ;
- отсутствие дифракционных эффектов от переотражения на двух рельефах;
- возможность использования отражающего варианта.

На рис. 1 продемонстрирована центральная часть фазовой функции линзы-решетки.

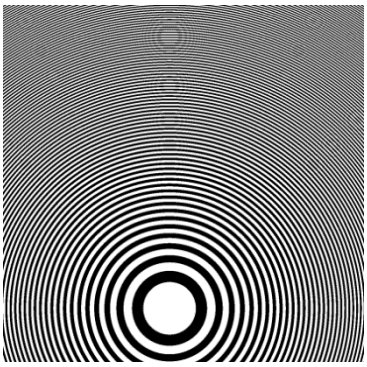
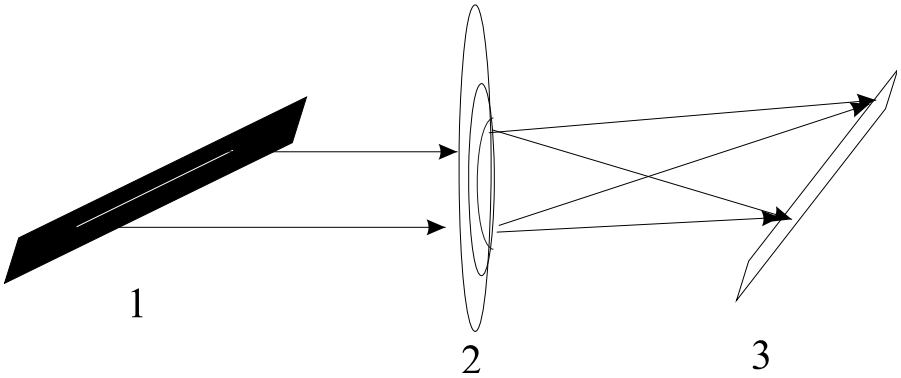


Рис. 1. Центральный фрагмент фазовой функции линзы-решетки

На рис. 2 продемонстрирована экспериментальная схема, которая состоит из горизонтальной щели сканирования (1), линзы-решетки (2) и регистрирующей плоскости (3), которая установлена под углом 25°. Линза-решетка была изготовлена с фокусным расстоянием 12 мм для длины волны 550 нм. Диаметр линзы 1,5 мм. Плоскость ПЗС матрицы (3) регистрирует спектр от 400 до 700 нм.



1 — горизонтальная щель сканирования; 2 — линза-решетка;
3 — регистрирующая плоскость, установленная под углом к оптической оси
Рис. 2. Экспериментальная установка спектрометра, основанного на линзе-решетке

Линза-решетка была изготовлена методом фотолитографии на кварцевой подложке. На ее основе был собран изображающий гиперспектрометр, который по размерам и массе почти не отличается от ПЗС камеры, на основе которой он был сделан.

Заключение

Предложена новая компоновка изображающего спектрометра, основанная на использовании нового дисперсионного элемента — линзы-решетки. Была изготовлена линза-решетка и на основе нее собрана экспериментальная схема спектрометра. Данный спектрометр является наиболее компактным и недорогостоящим, так как не содержит элементы на криволинейных плоскостях.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-19-00114).

Источники

[1] James J. Spectrograph Design Fundamentals. — Cambridge University Press, 2007.
[2] Palmer C. Diffraction grating handbook / C. Palmer, E. Loewen. — Newport Corporation, 2005.
[3] Скиданов Р.В. Исследование изображающего спектрометра на основе дифракционной линзы / Р.В. Скиданов, В.А. Бланк, А.А. Морозов // Компьютерная оптика. — 2015. — 39 (2). — С. 218–223.
[4] Lyons D. Image spectrometry with a diffractive optic // SPIE Proc. — 1995. — Vol. 2480. — P. 123–131.
[5] Yang C. Demonstration of a PDMS based hybrid grating and Fresnel lens (G-Fresnel) device / C. Yang, K. Shi, P. Edwards, Z. Liu // Optics Express. — 2010. — 18 (23). — P. 23529–23534.
[6] Yang C. Proposal and demonstration of a spectrometer using a diffractive optical element with dual dispersion and focusing functionality / C. Yang, P. Edwards, K. Shi, Z. Liu // Optics Letters. — 2011. — 36 (11). — P. 2023–2025.
[7] Yang C. A compact optical spectrometer based on a single-grating Fresnel diffractive optical element / C. Yang, P.S. Edwards, K. Shi, Z. Liu // SPIE Proc. — 2012. — 8374. — P. 123–131.

The diffractive optical elements with dual functionality in imaging hyperspectrometer

V.A. Blank, R.V. Skidanov
Image Processing Systems Institute — Branch of the Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics"of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia
Samara National Research University, Samara, Russia

A new scheme of the imaging spectrometer based on a grating-lens has been proposed. This element was fabricated by photolithography.

4.3 Разработка оптической схемы измерительного стенда для контроля лучевой стойкости дифракционных решёток

К.С. Коренной[1, 2], Э.Р. Муслимов[1, 2]
[1]АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия
[2]Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

Огромный ряд таких технологических задач, как исследование физических свойств вещества, дистанционное обнаружение опасных выбросов в атмосфере, обработка металлов, проведение сложных медицинских операций и т.д. не обходится без применения мощного лазера. Эти задачи решаются с помощью лазеров как с постоянной генерацией излучения, так и с импульсной. Под понятием мощного лазера, работающего в импульсном режиме, речь идёт о лазере, который обладает высокой средней мощностью и высокими значениями энергии в импульсе [1]. Одним из высокоэффективных способов создать ультракороткий импульс, длительностью от нескольких пикосекунд до сотен фемтосекунд, с высокими энергетическими характеристиками, является компрессия лазерных импульсов, основанная на применении компрессора, состоящего из нескольких дифракционных решёток (ДР). Очевидно, что ДР в таком компрессоре должны обладать высокой лучевой стойкостью и дифракционной эффективностью [2]. Таким образом, задача контроля параметра лучевой стойкости ДР является весьма актуальной. В АО «НПО «ГИПО» успешно ведётся работа по разработке и изготовлению ДР с высокой дифракционной эффективностью и лучевой стойкостью.

Лучевая стойкость любого оптического элемента зависит от его физических, технологических свойств, а также от параметров излучения, воздействие которого испытывается на образце. Однако для ДР появляется ещё один важный фактор, влияющий на лучевую стойкость — коэффициент заполнения [2]. Также стоит отметить, что распределение амплитуды электрического поля излучения, падающего на ДР, зависит от угла падения. В связи с этим методики, представленные в работах [4] и [5], не могут использоваться применительно к ДР, поэтому необходимо разработать новую методику и средство измерения лучевой стойкости ДР.

При разработке новой методики и макета для измерения лучевой стойкости ДР необходимо знать начальные данные импульса: длина волны излучения, мощность, частота, диаметр импульсного излучения, параметр M^2 и т.д. Измерения и контроль лучевой стойкости оптических элементов проводится в соответствии с требованиями ОСТ 11 070.802-80 и ISO 11254 на аттестованной установке при значениях параметров лазерного излучения, указанных в табл. 1.

Однако данные требования не допускают проверку лучевой стойкости оптических элементов в фемтосекундном диапазоне лазерного излучения, поэтому при создании новой методики необходимо учитывать не только параметры лазерного импульса, но и технологические особенности проверки лучевой прочности для ДР, в частности, изменяющийся угол падения излучения.

Табл. 1 Параметры лазерного излучения для контроля лучевой стойкости оптических элементов

Параметр	Значение
Режим генерирования лазерного излучения	Одномодовый, моноимпульсный
Длина волны лазерного излучения λ, нм	1064
Длительность импульса t, с	$(10\pm1)\cdot10^{-9}$
Диапазон частот следования лазерных импульсов f, ГЦ	От 0,1 до 100
Диапазон диаметра пучка лазерного излучения d, см	От $5\cdot10^{-3}$ до $30\cdot10^{-3}$
Диапазон количества испытуемых точек	От 30 до 200
Диапазон количества импульсов излучения, воздействующих в одну область образца	От 1 до 1000
Величина дискретного увеличения плотности лазерного излучения, %, не более	10
Угол падения лазерного излучения на поверхность образца, град	0
Условия измерения	Нормальные климатические

В работе [3] было показано, что существует взаимосвязь между лучевой стойкостью и дифракционной эффективностью (ДЭ), которая, помимо параметров ДР, зависит и от эффекта «замывания», получаемого при нанесении диэлектрических покрытий. Исходя из вышесказанного, авторы пришли к выводу, что при измерении ДР на лучевую стойкость основным контролируемым параметром является ДЭ. За критерий лучевой стойкости исследуемых образцов ДР принималась величина плотности энергии воздействующего излучения, при которой спад дифракционной эффективности в первом порядке спектра на длине волны зондирующего излучения за время воздействия, равное 1 с, составляет 10% от первоначальной величины. Этот способ позволяет наблюдать начальную стадию изменения дифракционных свойств ДР под действием интенсивного лазерного излучения и определить начальный пороговый уровень плотности потока энергии $W_{пор}$ [6].

Табл. 2 Параметры фемтосекундного волоконного лазера высокой мощности Fidelity-2, Coherent.

Параметр	Значение
Средняя мощность, Вт	>2
Центральная длина волны (номинальная), нм	1 070
Длительность импульса, фс	<55
FWHM, нм	>60
Мощность импульса, кВт	>450
Стабильность излучения, %	±0,5
M^2 (средний по X&Y)	<1,2
Диаметр пучка, мм	1,2±0,2
Расходимость пучка, мрад	<1,6

При расчёте оптической схемы прибора для контроля лучевой стойокости ДР в качестве источника мощного фемтосекундного лазерного излучения использовался лазер Fidelity-2 фирмы Coherent, а для проверки ДЭ — лазер постоянного излучения DTL-423, основные параметры которых представлены в табл. 2 и табл. 3.

Табл. 3 Параметры непрерывного лазера DTL-423, Лазер-Компакт

Параметр	Значение			
Мощность лазерного излучения (номинальное значение), мВт	300 + 5%	1000 + 5%	2000 + 5%	2500 + 4%
Центральная длина волны (номинальная), нм	1053			
Уровень оптических шумов в частотном диапазоне 10–20 МГц, % RMS	⩽0.5%			
Долговременная стабильность уровня мощности (за 8 час)	⩽2% от пика к пику(СКО ⩽ 0,5%)			
M^2 (средний по X&Y)	⩽1,1			
Диаметр пучка, мм	1,2±0,1			
Расходимость пучка, мрад	⩽1,2			

На рис. 1 представлена оптическая схема прибора для измерения лучевой прочности ДР. Для расчёта оптических параметров узлов схемы были использованы программные комплексы Zemax, Mathlab. В ходе оптимизации схемы был определён вариант, отвечающий необходимым критериям при исследовании ДР на лучевую стойкость.

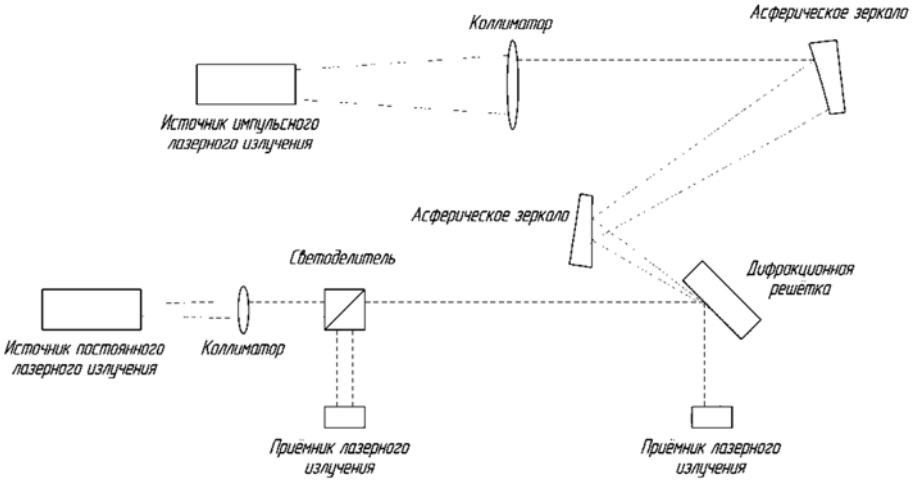


Рис. 1 Оптическая схема прибора для контроля лучевой прочности ДР

Источники

[1] Ровинский Р.Е. Мощные технологические лазеры. — 2005 г. 103 с.
[2] Белокопытов А.А. Дифракционные решетки для компрессии лазерных импульсов / А.А. Белокопытов, К.С. Коренной, А.И. Любимов, Т.А. Миронова, А.Ф. Скочилов // Голография. Наука и практика Сборник трудов 11-й Международной конференции «ГолоЭкспо 2014», 16–17 сентября 2014 г. Сочи, Россия
[3] Андреев А.А. Исследование дифракционных решеток с высокой лучевой стойкостью для компрессии мощных лазерных импульсов / А.А. Андреев, В.Д. Винокурова, Р.Р. Герке, Е.Г. Салль, В.Е. Яшин // Оптический журнал. — 2005. — Том 72. — №4. — С. 12.
[4] Бабаянц Г.И. Разработка и исследование диэлектрических покрытий с высокой лучевой прочностью / Г.И. Бабаянц, С.Г. Гаранин, В.Г. Жупанов, Е.В. Клюев, А.В. Савкин, С.А. Сухорев, О.А. Шаров // Квантовая электроника. — 2005. — Том 35. — №7.
[5] Горбунов А.В. Исследование воздействия импульсного лазерного излучения на кварцевое стекло с CD — плёнками на поверхности в вакууме / А.В. Горбунов, Н.В. Классен, К.Ю. Вуколов, Д.В. Орлинский // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. — 2005. — 2. — С. 30–38.
[6] Вейко В.П. Лазерная обработка / В.П. Вейко, М.Н. Либенсон; под ред. С.П. Митрофанова. — Л., 1973. — 191 с.

Development of the optical layout for a measurement stand designed to monitor the laser damage threshold of diffraction gratings

K.S. Korennoy[1, 2], *E.R. Muslimov*[1, 2]
[1] JSC "NPO "State Institute of Applied Optics", Kazan, Russia
[2] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

High-power lasers are used to meet a great deal of technological challenges, namely: studies of matter physical properties, remote location of hazardous discharges into the atmosphere, metalworking, performance of composite medical operations etc. These challenges are met by means of both continuous radiation generation lasers and pulse generation lasers. The term "a high-power laser, operating under the pulse conditions", implies a laser, featuring a high average power and high values of pulse energy. One high-efficient way to produce an ultra-short pulse, whose duration is from several picoseconds up to hundreds of femtoseconds, featuring high energy characteristics is a laser pulse compression. This method comprises several diffraction gratings (DGs). It is quite obvious, that DGs of such a compressor should feature a high laser damage threshold and a high diffraction efficiency. So the problem of monitoring the laser damage threshold parameter of DGs is rather actual.

Fig. 1 shows an optical layout of the device intended to measure the laser damage threshold of diffraction gratings. This paper presents characteristics of the optical layout units and analyses the theoretical data of the laser pulse.

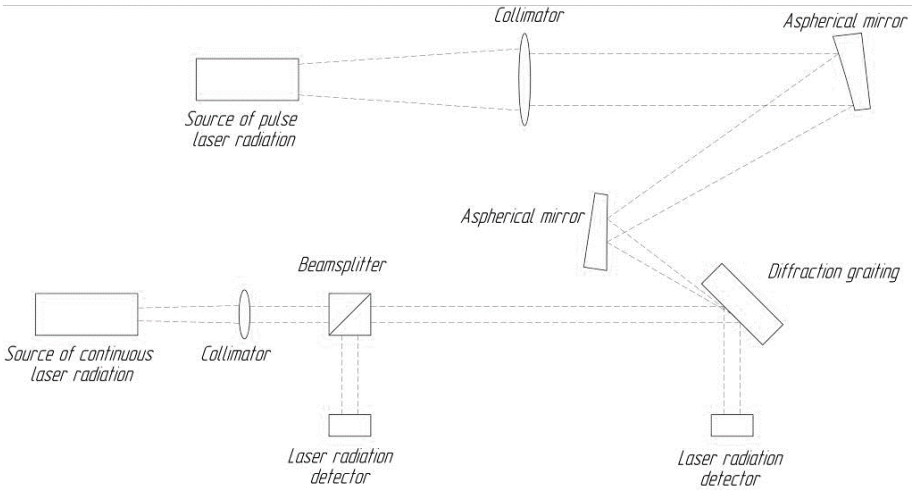


Fig. 1

4.4 Делительная машина маятникового типа применительно к решению проблемы изготовления нарезных дифракционных решеток на неплоских подложках

А.В. Лукин, А.Н. Мельников
АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе представлены обзорные материалы, характеризующие современное состояние делительной техники, применяемой для изготовления с помощью специальных алмазных резцов нарезных дифракционных решеток, в России и зарубежом [1–4].

а)

б) в)

а — делительной машины ИГ-91, построенной по кинематической схеме Роуланда; б — круговой делительной машины типа МДА-10; в — делительной машины маятникового типа
Рис. 1. Общий вид образцов делительной техники

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики» обладает парком делительной техники трех типов: классические делительные машины Роуландского типа (12 единиц), круговые делительные машины (3 единицы), делительная машина маятникового типа (действующий макет). С их помощью изготавливаются широкая номенклатура нарезных дифракционных оптических элементов (спектральные дифракционные решетки на плоских и вогнутых подложках, круговые и линейные осевые синтезированные голограммы на плоских, вогнутых и выпуклых подложках, фотошаблоны для киноформов, решетки с высокой дифракционной эффективностью и повышенной лучевой стойкостью для инфракрасных лазеров, нарезные измерительные решетки, решетки-поляризаторы). В качестве

иллюстрации на рисунке приводится общий вид трех образцов делительной техники АО «НПО «ГИПО».

Особый интерес представляют нарезные сверхсветосильные высокочастотные дифракционные решетки для создания гиперспектральной аппаратуры космического базирования, так как в данном случае голограммные дифракционные решетки малопригодны.

Рассматриваются и анализируются возможности реализации известных технических решений в делительной технике и поиск новых путей применительно к решению проблемы изготовления сверхсветосильных высокочастотных дифракционных решеток.

Источники

[1] Лукин А.В. Делительная машина маятникового типа для изготовления нарезных периодических рельефно-фазовых структур / А.В. Лукин, А.Н. Мельников, С.О. Мирумянц // Оптический журнал. — 2007. — Том 74. — №1. — С. 44–49.
[2] Li X. 300 mm Ruling Engine Producing Gratings and Echelles under Interferometric Control in China / X. Li, H. Yu, X. Qi, S. Feng, J. Cui, S. Zhang, Jirigalantu, Yu. Tang // Applied Optics. — 2015. — Vol. 54. — №7. — P. 1819–1826.
[3] Корпорация «Hitachi Group» / URL: http://www.hitachi-hightech.com.
[4] Liu D.C. Control System Development of Grating Ruling Engine Based on MATLAB/Simulink / D.C. Liu, Y. Shen, J. Zhong, G.F. Lian, C.A. Zhu // Applied Mechanics and Materials. — 2012. — Vol. 110-116. — P. 4788–4794.

Dividing machine pendulum type with regard to the problem of production of threaded gratings on non-flat substrates

A.V. Lukin, A.N. Melnikov
JSC “NPO “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

The report presents the survey materials that characterize the current state of the art pitch, used for the manufacture of a special diamond tools threaded diffraction gratings, in Russia and abroad.

4.5 Экспериментальное исследование объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток для астрономического спектрографа умеренного разрешения

А.А. Белокопытов[1], Ф.А. Саттаров[1], Н.М. Шигапова[1], Э.Р. Муслимов[1, 2], И.И. Ахметшина[1, 2]
[1] АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия
[2] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

Известно, что использование объемно-фазовых голографических дифракционных решеток (ГДР) в схеме спектрографа позволяет достичь высокой концентрации энергии в рабочей области спектра [1]. Кроме того, спектральная селективность ГДР позволяет реализовать комплексирование измерительных каналов, как показано, например в [2]. Подобный принцип предложено использовать для построения астрономического спектрографа умеренного разрешения. В основе оптической схемы такого прибора лежит каскад объемно-фазовых ГДР, каждая из которых формирует спектр в заданном интервале со сравнительно высоким разрешением. Каждая решетка имеет сравнительный узкий рабочий спектральный интервал, в пределах которого она имеет высокую дифракционную эффективность и обеспечивает формирование спектра. За пределами данного интервала решетка работает как простая плоскопараллельная пластинка. Решетки в каскаде развернуты в меридиональной и сагиттальной плоскостях таким образом, что линейная дисперсия постоянна для всех интервалов, отдельные спектральные изображения центрированы и разнесены по вертикали. Получаемая в результате схема занимает промежуточное положение между традиционными спектрографами с объемными ГДР и эшелле-спектрографами, поскольку имеет небольшое число строк в изображении спектра, умеренное спектральное разрешение и повышенное пропускание оптического тракта.

В настоящей работе рассматривается оптическая схема уменьшенного макета астрономического спектрографа с каскадом голограммных решеток. Рабочий спектральный диапазон макета охватывает длины волн от 430 до 680 нм и разделяется на 3 интервала: 430–513, 513–597 и 597–680 нм. Диаметр коллимированного пучка в спектрографе составляет 40 мм. Длина строки в изображении спектра составляет 20 мм, расстояние между строками — не менее 2 мм. В качестве коллиматора и камеры используются серийные объективы с фокусным расстоянием 133 мм и относительным отверстием 1:2,8.

Параметры дифракционных решеток, устанавливаемых в каскад, приведены в табл. 1.

На рис. 1 приведен общий вид оптической схемы спектрографа.

Табл. 1

No	**1**	**2**	**3**
Частота	1726 мм$^{-1}$	1523 мм$^{-1}$	1205 мм$^{-1}$
Диапазон	430–513 нм	513–597 нм	597–680 нм
Разворот склейки в меридиональной плоскости	28,333°	22,851°	1,701°
Разворот склейки в сагиттальной плоскости	3,387°	1,409°	3,885°
Угол падения на слой	18,269°	14,891°	2,636°
Угол дифракции после слоя	13,047°	17,218°	29,291°
Световой размер	40×40 мм	40×45,5 мм	40×65,5 мм

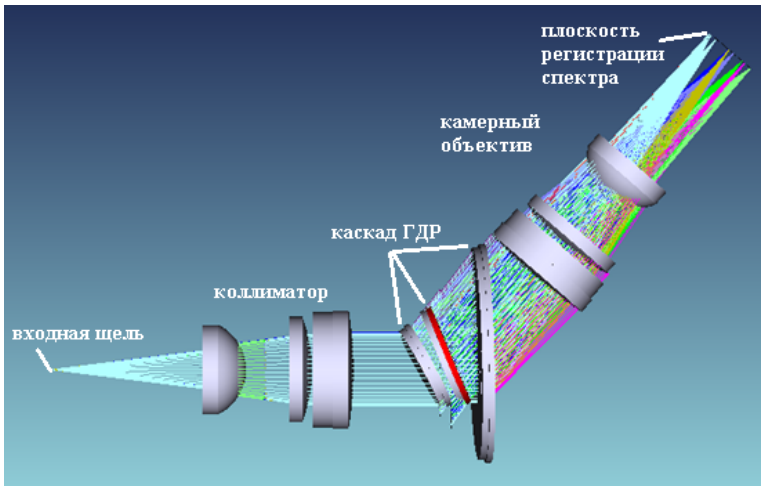
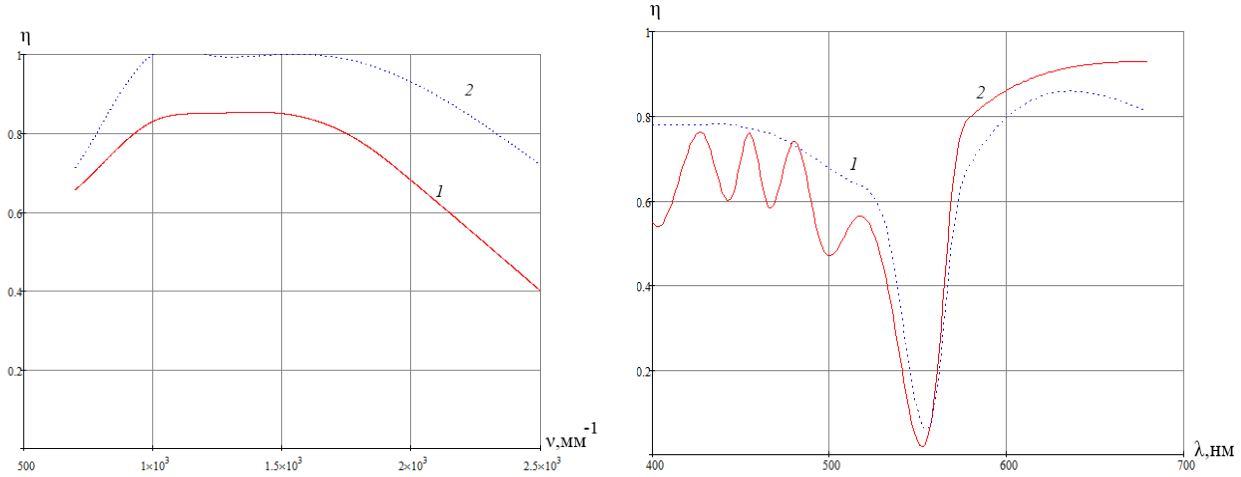


Рис. 1. Общий вид схемы спектрографа

Дифракционные решетки с расчетными параметрами записаны в ОА «НПО «ГИПО» по стандартной технологии [3]. Запись велась на слоях БХЖ (использованы серийные фотопластинки, выпускаемые ПО «Славич»). Все решетки заклеены покровными стеклами толщиной 2,2 мм.

С использованием полученных образцов проведено исследование дифракционной эффективности и пропускания объемно-фазовых решеток. Результаты представлены на рис. 2: а — экспериментальные зависимости максимальной дифракционной эффективности ГДР от частоты штрихов решетки (1 — дифракционная эффективность, 2 — фазовая эффективность), б — экспериментальные зависимости пропускания ГДР в нулевом порядке дифракции при различных экспозициях записи $E_2 > E_1$ (на примере второй решетки каскада). Отметим, что для наглядности данные были дополнены результатами измерений других объемно-фазовых решеток, изготовленных в НПО «ГИПО».



а) максимальная дифракционная эффективность б) пропускание

Рис. 2. Экспериментальные характеристики ГДР

Таким образом, результаты измерений показывают, что основные характеристики объемно-фазовых решеток хорошо согласуются с расчетными, а дифракционная эффективность в первом порядке дифракции в пределах рабочей спектральной полосы и пропускание за ее пределами достаточно высоки, чтобы обеспечить работоспособность каскада решеток.

На следующем этапе исследования будет изготовлен и исследован макет спектрографа, определено достигаемое спектральное разрешение и изучено взаимное влияние каналов.

Источники

[1] Колфилд Г. Оптическая голография. В 2-х томах. Том 1 / Пер. с англ. под ред. Г. Колфилда. — М.: Мир, 1982 —Том 1 — 376 с.
[2] Pavlycheva N.K. Compact dual-band spectrograph / N.K. Pavlycheva and E.R. Muslimov // Advanced Optical Technology. — 2009. — №6. — P. 455–461.
[3] 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 олографии», Санкт-Петербург, 22–24 мая 2007. — С. 144–147.

Experimental study of volume-phase holographic gratings for a moderate resolution astronomical spectrograph

A.A. Belokopytov[1], F.A. Sattarov[1], N.M. Shigapova[1], E.R. Muslimov[1, 2], I.I. Akhmetshina[1, 2]
[1] JSC “NPO “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia
[2] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

It’s known that use of holographic gratings in a spectrograph scheme allows to achieve high energy concentration in the working spectral range [1]. Also, holograms spectral selectivity makes possible coupling of measuring channels as it shown in [2]. We propose to use this principle in an astromonical spectrograph scheme. It’s based on a cascade of volume phase holographic gratings. Each of them creates spectrum in a narrow band with high resolution and diffraction efficiency, while outside the range it works as a usual plane-parallel plate. The gratings are tilted in both of tangential and sagittal planes to provide equal dispersion and centering in the spectral rows and proper gaps between them. The proposed scheme is in between of usual spectrographs with VPH’s and echelle-spectrographs, because it has a few rows in the spectral image with a moderately high resolution together with high throughput.

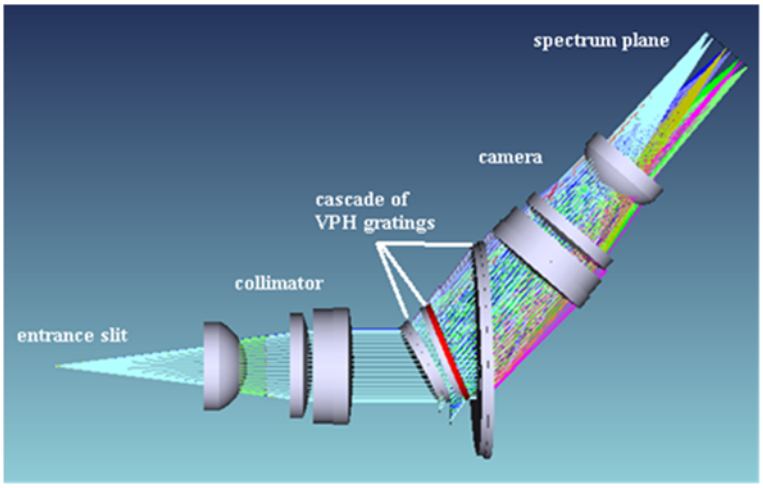
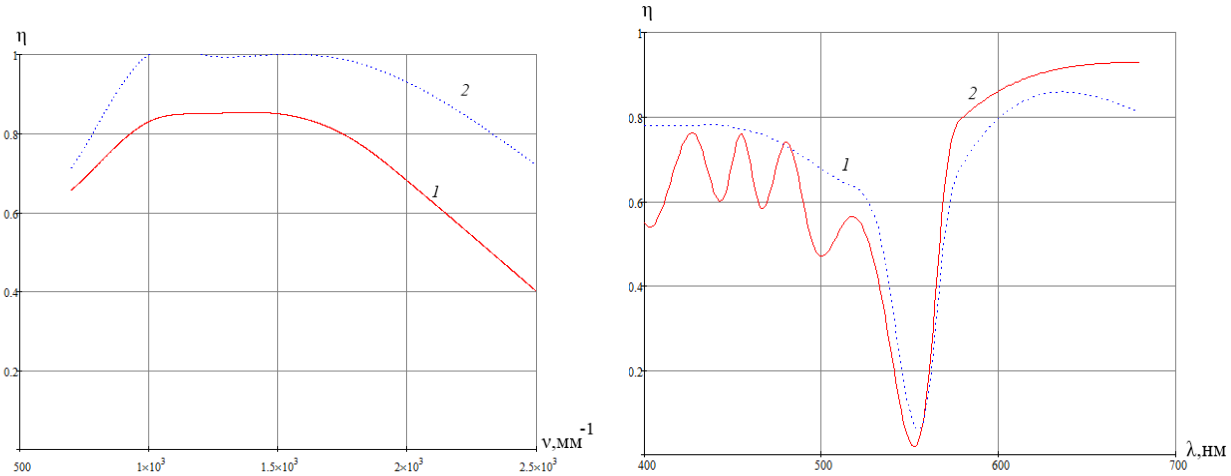


Fig. 1. The spectrograph scheme general view

We consider a scheme of reduced prototype of the spectrograph. It works in the range 430–680 nm, which is divided to 3 intervals: 430–513, 513–597 and 597–680 nm. The collimated beam diameter is 40 mm. The row land in spectral image is 20 mm and the gap between rows is more than 2 mm. Commercial lenses (133 mm, F/2.8) are used as the collimator and camera. The optical scheme is shown on Fig. 1. The gratings are mounted in the following order: first grating is working range is 430–513 nm and it's grooves frequency is 1726 mm^{-1}, corresponding parameters for the second grating are 513–597 nm and 1523 mm^{-1}, and that for the third one are 1205 mm^{-1} and 597–680 nm.

The gratings were manufactured in JSC "NPO "GIPO" (State Inst. of Applies Optics) with use of the standard technology [3]. The holograms are recorded on DCG layers (commercial plates produced by "Slavich" are used). All the gratings are covered with a 2.2 mm glass plate.

The manufactured gratings are tested for throughput and diffraction efficiency. The results are presented on fig 2: a — experimental dependencies of maximal diffraction efficiency on grooves frequency (1 — diffraction efficiency, 2 — phase efficiency), b — experimental dependencies of the 0th order throughput for different recording exposures $E_2 > E_1$ (on example of the 2nd grating). We must note that the experimental results were augmented by data for other VPH gratings fabricated in GIPO to plot the graphs.



a) maximal diffraction efficiency b) throughput

Fig. 2. Experimental performance of the VPH gratings

So the results clearly show that the main properties of the gratings are in agreement with the theoretical values. The 1st order diffraction efficiency within the working range and throughput outside of it are high enough to provide the spectrograph operability.

On the next stage the spectrograph prototype is to be assembled and tested. The spectral resolution and channels cross-talks should be defined experimentally.

References

[1] Colfield G. Optical holography — M.: Mir, 1982 — Vol. 1 — 376 p.

[2] Pavlycheva N.K. Compact dual-band spectrograph / N.K. Pavlycheva, E.R.Muslimov // Advanced. Optical Technology. — 2009. — №6. — P. 455–461.

[3] Lukin A.V. et al. Denisyuk hlograms on "thick" DCG layers as optical elements: selective mirrors, NOTCH-filters and diffraction gratings // Proc. of All-Russian Seminar "Yu.N. Denisyuk — founder of the domestic holography", S. Petersburg, May 22–24, 2007. — P. 144–147.

Устные доклады
Секция №5

Голографическая интерферометрия, голографическая память, оптико-голографическая обработка информации

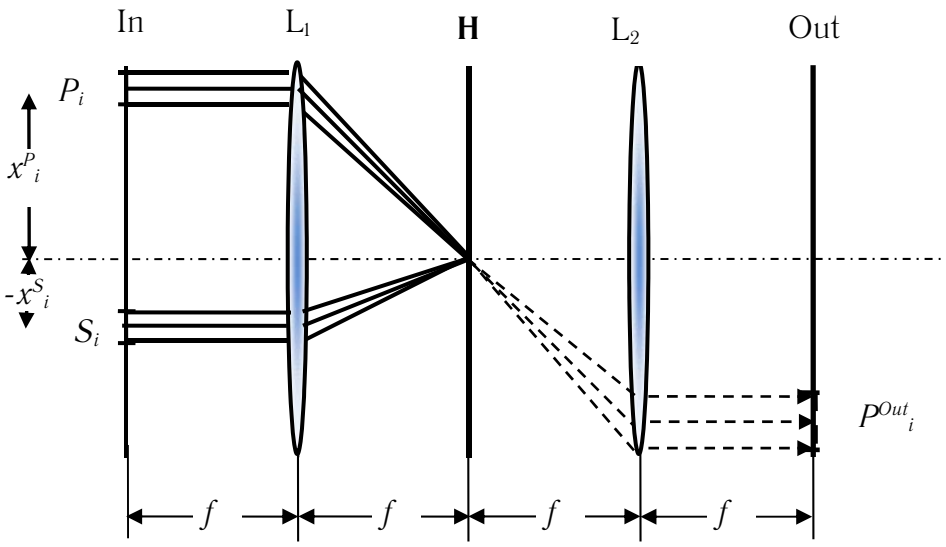
Oral presentations
Section №5

5.1 Анализ выявления коррелированных фрагментов в серии изображений наложенными голограммами

А.В. Павлов
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Метод наложенных голограмм (НГ) широко применяется для построения памяти [1–6]. Актуален поиск возможностей метода НГ по реализации более сложных моделей обработки информации. В [7] показана возможность выявления коррелированных фрагментов в последовательности образов, записанной методом НГ. В докладе, в развитие этого подхода, дан анализ зависимости отношения дисперсий коррелированных и некоррелированных фрагментов образов от свойств образов, условий записи голограмм и характеристик голографических регистрирующих сред.

Рассматривается запись методом НГ в схеме голографии Фурье (рис. 1) двух наборов изображений (образов) $\{S_i\}$ и $\{P_i\}$.



In — входная плоскость, P_i, S_i записываемые на голограмме H образы; x^P, x^S — их сдвиги относительно главной оптической оси; L_1, L_2 — фурье-преобразующие линзы с фокусными расстояниями f; пунктир — ход лучей, восстанавливающих в плоскости Out $P^{Out}{}_i$ при предъявлении в In S_i

Рис. 1

Представим образы в виде

$$\begin{cases} S_i = S_i^C + S_i^U \\ P_i = P_i^C + P_i^U \end{cases}, \quad \begin{cases} S_i^C(x) = \sqrt{\rho^S}\, S_i(x) \\ S_i^U(x) = \left(1 - \sqrt{\rho^S}\right) S_i(x) \end{cases}, \quad \begin{cases} P_i^C(x) = \sqrt{\rho^P}\, P_i(x) \\ P_i^U(x) = \left(1 - \sqrt{\rho^P}\right) P_i(x) \end{cases}, \tag{1}$$

где символы с верхними индексами обозначают фрагменты: с индексом C — коррелированные для ряда образов, а с индексом U — некоррелированные, т.е. входящие в состав только одного образа; ρ — коэффициенты взаимной корреляции образов в $\{S_i\}$ и $\{P_i\}$. Каждая (i-я) НГ описывается

$$H_i(\nu_x) = F(P_i(x))F^*(S_i(x)) + F(S_i(x))F^*(P_i(x)) = H_i^{S\to P}(\nu_x) + H_i^{P\to S}(\nu_x),$$

где F — символ преобразования Фурье, астериск — комплексного сопряжения, ν — пространственная частота. Мультиплексная голограмма (МГ) — сумма НГ:

$$H(\nu_x)=\sum_{i=1}^{n}\left(H_i^{S\to P}(\nu_x)+H_i^{P\to S}(\nu_x)\right),$$

При предъявлении в плоскости In образа S_i, отклик МГ в плоскости Out:

$$\begin{aligned}P_{Out}(x)&=P_{Out}^{C}(x)+P_{Out}^{N}(x)=\\&=\left[1+\rho_{ij}^{S}(n-1)\right]\left\{P_i^{C}(x+x_P)*\left(S_i(x)\otimes S_i(x)\right)\right\}+P_i^{U}(x+x_P)*\left(S_i(x)\otimes S_i(x)\right)+\\&+\rho_{ij}^{S}\sum_{i\neq j}P_j^{U}(x+x_P)*\left(S_i(x)\otimes S_i(x)\right)+\sum_{i\neq j}P_j(x+x_P)*\left(S_i^{U}(x)\otimes S_i^{U}(x)\right),\end{aligned}\qquad(2)$$

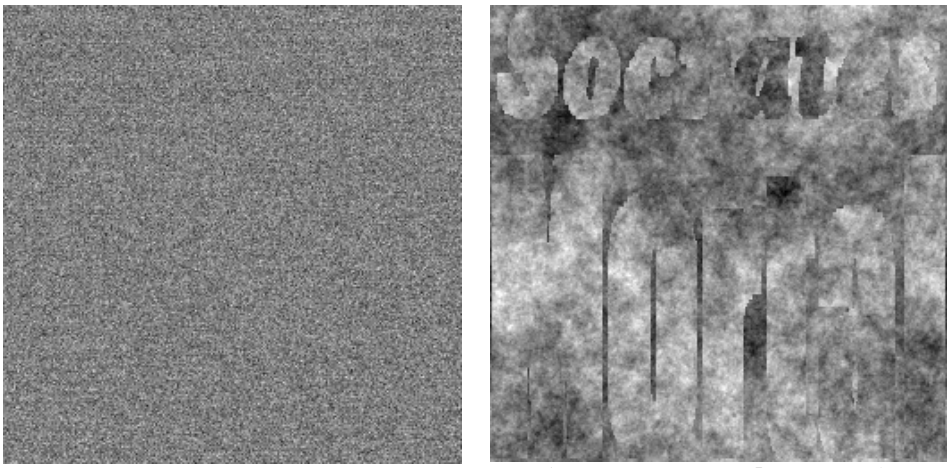
где * и ⊗ — символы операций свертки и корреляции, верхние индексы C и N обозначают коррелированный фрагмент, описываемый первым слагаемым, и некоррелированные, описываемые вторым, третьим и четвертым слагаемыми, соответственно. Все слагаемые в (2) пространственно совмещены.

Выявление коррелированных фрагментовна фоне остальных возможно, если интегральная оценка модулированности $P_{Out}^{C}(x)$ выше, чем для $P_{Out}^{N}(x)$. В качестве оценки модулированности фрагмента принята его дисперсия.

Выражение (2) отличается в зависимости от того, объемные или тонкие голографические регистрирующие среды (ГРС) использованы для записи МГ. В первом случае члены $\left(S_i(x)\otimes S_i(x)\right)$ и $\left(S_i^{U}(x)\otimes S_i^{U}(x)\right)$, описывающие как свойства самих образов, так и условия записи голограмм, силу угловой селективности объемных голограмм могт быть сведены к дельта-функции, во втором такое сведение неправомочно. Вывод аналитических выражений для отношения дисперсий громоздок. Приведем здесь для иллюстрации наглядные результаты численного моделирования.

Моделировался пример записи НГ и восстановления МГ на объемных и тонких ГРС по схеме голографии Фурье рис. 1 Пары записываемых образов наборов $\{S_i\}$ и $\{P_i\}$ моделировались реализациями размером 256×256 пикселей случайных полей, генерированных по моделям фрактального броуновского движения (процесса со стационарными приращениями) с параметром Хёрста $H = 0{,}1$ и однородных полей с разными радиусами корреляции, включая дельта-коррелированные. Каждый образ содержал:

1) коррелированный фрагмент — надписи «Mortal» ($\{S_i\}$) и «Men» ($\{P_i\}$), заполненные одной для всех образов реализацией случайного поля;



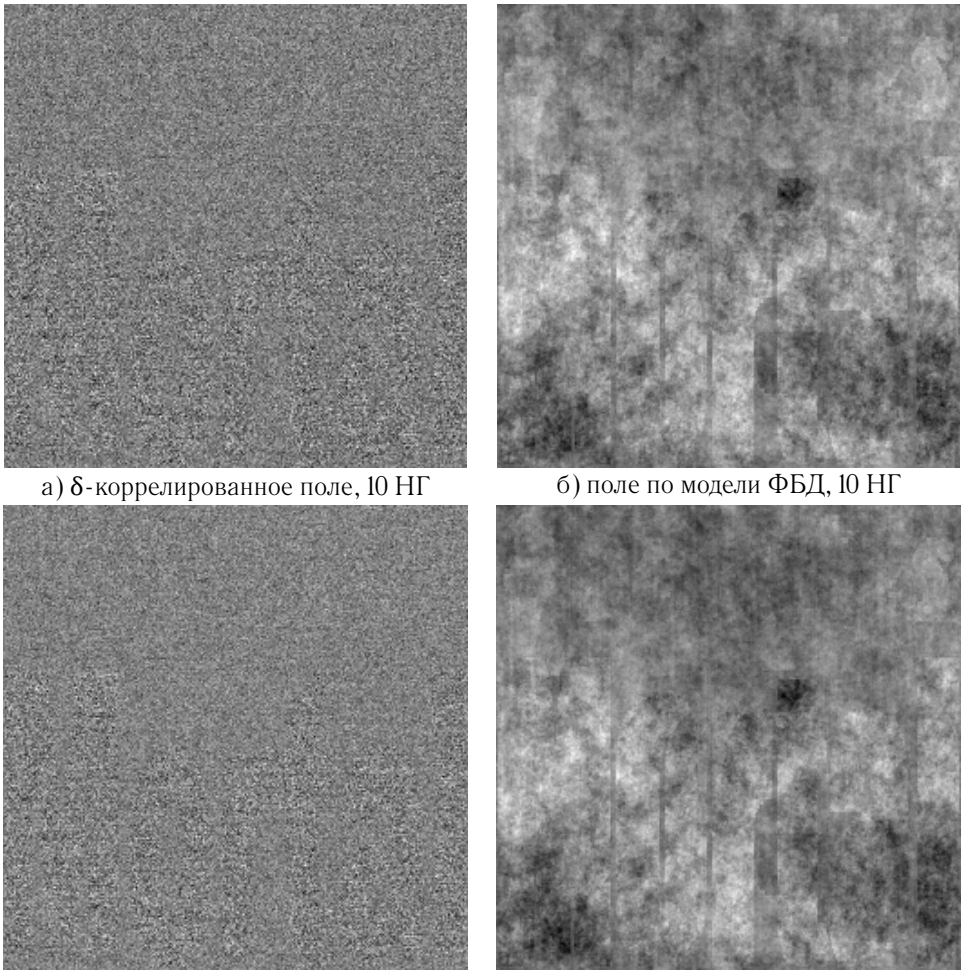
а) дельта-коррелированное поле б) модель поля — ФБД, H = 0,1

Рис. 2. Образ «Socrates Mortal»

2) некоррелированные, включающие личные имена «Socrates», «Plato» и т.п., заполненные разными реализациями полей, а также и всю остальную часть образа, исключая коррелированные фрагменты образов.

На рис. 2 даны примеры эталонных образов — для дельта-коррелированного поля (рис. 3а), в отличие от поля, описываемого моделью ФБД (рис. 2б), надписи в структуре образы визуально не выделяются.

На рис. 3 даны образы, восстановленные при разном числе НГ.



а) δ-коррелированное поле, 10 НГ б) поле по модели ФБД, 10 НГ

в) δ-коррелированное поле, 20 НГ г) поле по модели ФБД, 20 НГ

Рис. 3. Восстановленный образ

Из рис. 3а, в, можно видеть, что до 20 НГ (рис. 5г) происходит выявление коррелированного фрагмента серии образов — надписи «Mortal». Дальнейший рост числа НГ (до 59 НГ) к существенному улучшению выделения надписи «Mortal» из общего фона не приводил. Для подтверждения этого эффекта на рис. 4а в качестве количественных оценок эффективности выделения даны зависимости от числа примеров нормированных дисперсий коррелированных и некоррелированных фрагментов, а также их отношения. Последняя зависимость дает оценку эффективности выделения коррелированного фрагмента «Mortal» из фона.

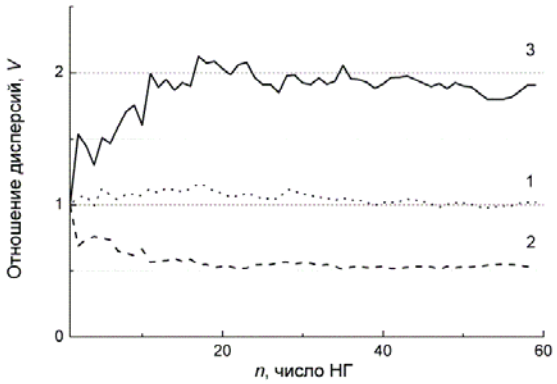


Рис. 4. Зависимости отношения дисперсий восстановленных фрагментов коррелированных и некоррелированных от числа НГ для тонких ГРС

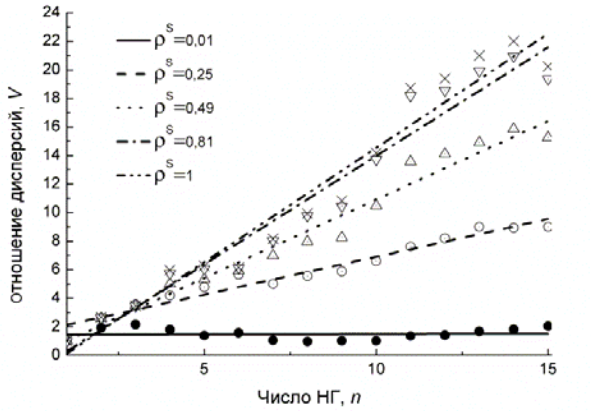


Рис. 5. Зависимости отношения дисперсий восстановленных фрагментов от числа НГ и коэффициентов корреляции опорных образов ρ^S для объемных ГРС

Таким образом, из сравнения рис. 4 и 5 видно, что переход к объемным ГРС позволяет существенно повысить эффективность выделения коррелированных фрагментов методом наложенных голограмм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 15-01-04111-а.

Источники

[1] Van Heerden P.J. // Applied Optics. — 1963. — Vol. 2. — №4. — P. 387–392.
[2] Van Heerden P.J. // Applied Optics. — 1963. — Vol. 2. — №4. — P. 393–400.
[3] Микаэлян А.Л., Бобринев В.И. // ДАН СССР. — 1970. — Том 191. — №4. — С. 799.
[4] Микаэлян А.Л., Бобринев В.И. // Радиотехника. — 1974. — Том 29. — №5. — С. 7–18.
[5] Бетин А.Ю., Бобринев В.И., Евтихиев Н.Н. и др. // Квантовая электроника. — 2013. — Том 43. — №1. — С. 87–89.
[6] Betin A.Yu., Bobrinev V.I., Odinokov S.B., et al. // Applied Optics. — 2013. — Vol. 52. — №33. — P. 8142–8145.
[7] Павлов А.В. // Известия ВУЗов. Физика. — 2015. — Том 58. — №10. — С. 80–86.

On the revealing of correlated parts of serial of images by superimposed holograms

A.V. Pavlov
Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

Superimposed holograms technique is widely used for associative memory construction. It is actual task to implement more complex model of information associative processing by the technique. In our previous communication the method was used to reveal correlated parts of the stored images series. By developing the approach an analysis of the revealing efficiency by the technique on the properties of the images, the holograms recording and holographic recording media are discussed.

The research was supported by RFBR, grant 15-01-04111-a.

5.2 Интерферометр Саундерса с плоским эталоном для измерения диаметра кремниевого шара

Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин, В.Л. Минаев
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия

В настоящее время для переопределения единицы массы килограмма ведутся интенсивные исследования национальными метрологическими институтами, которые участвуют в Международном проекте «Авогадро». В этом проекте используется эталон в виде шара диаметром около 94 мм из химически чистого изотопа кремния ^{28}Si. Точное определение числа Авогадро позволяет переопределить килограмм через атомную массу. Этот подход к определению килограмма тесно связан с новыми прецизионными измерениями постоянной (числа) Авогадро. Указанный подход развивается в основных метрологических центрах мира. Для определения количества атомов кремния внутри шара в первую очередь необходимо знать его объем и форму. Для этих целей используются различные интерферометры.

Объект измерений — шар с малым радиусом кривизны. Это накладывает ряд специфических ограничений на использование стандартных схем интерферометров. Наиболее часто применяется схема интерферометра Фабри — Перо, во внутреннюю полость которого помещается исследуемый шар. В результате возникают два интерферометра Физо, образованные эталонными зеркалами основного интерферометра Фабри — Перо и поверхностью шара. Следовательно, такой интерферометр необходимо освещать с двух сторон и регистрировать две интерферограммы противоположных участков поверхности шара.

Первый такой двухсторонний интерферометр для бесконтактных измерения диаметра и объема шаров или цилиндров был предложен Саундерсом из Национального Бюро Стандартов США [1]. На рис. 1 схематично показан этот интерферометр. В качестве объекта использовался стальной шар, который был помещен внутрь интерферометра Фабри — Перо, образованного плоскими эталонными поверхностями E_1 и E_2 (далее просто эталонами). Для устранения переотражений внутри эталонов они выполнены в виде клина. Расстояние D между внутренними рабочими поверхностями эталонов определялось классическим способом измерения базовой длины эталона Фабри — Перо путем фотографирования интерференционных колец на 4-х длинах волн ртутной спектральной лампы и последующего расчета. Световой пучок от стабилизированного по частоте He—Ne лазера падает строго по нормали к внутренней поверхности каждой эталонной плоскости. С помощью подвижного экрана последовательно открывается световой пучок BEAM 1 или BEAM 2. Первая система интерференционных полос (колец Ньютона) образуется световыми пучками, отраженными от поверхности сферы и ближайшей эталонной плоскости E_1.

Анализ концентрических круговых полос Ньютона, наблюдаемых в выходной плоскости, позволяет определить величину зазора d_1 между сферой и эталонной плоскостью E_1. Похожие полосы получаются и с другой стороны сферы, по которым определяется расстояние d_2 между сферой и эталонной плоскостью E_2. Диаметр сферы d затем вычисляется по формуле $d = D - d_1 - d_2$.

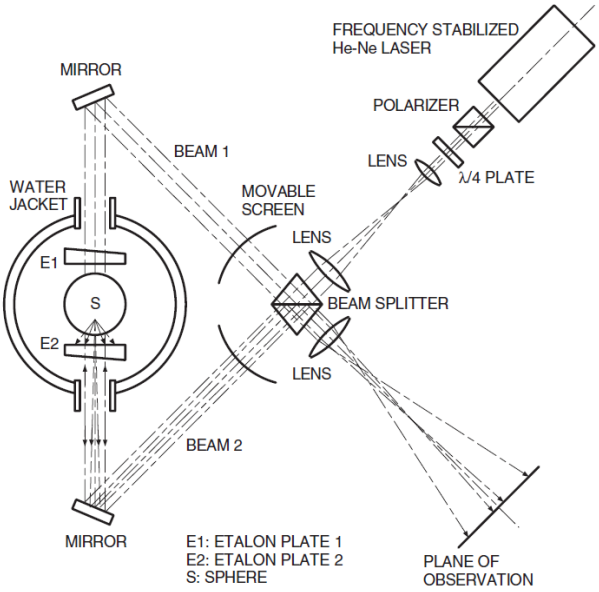
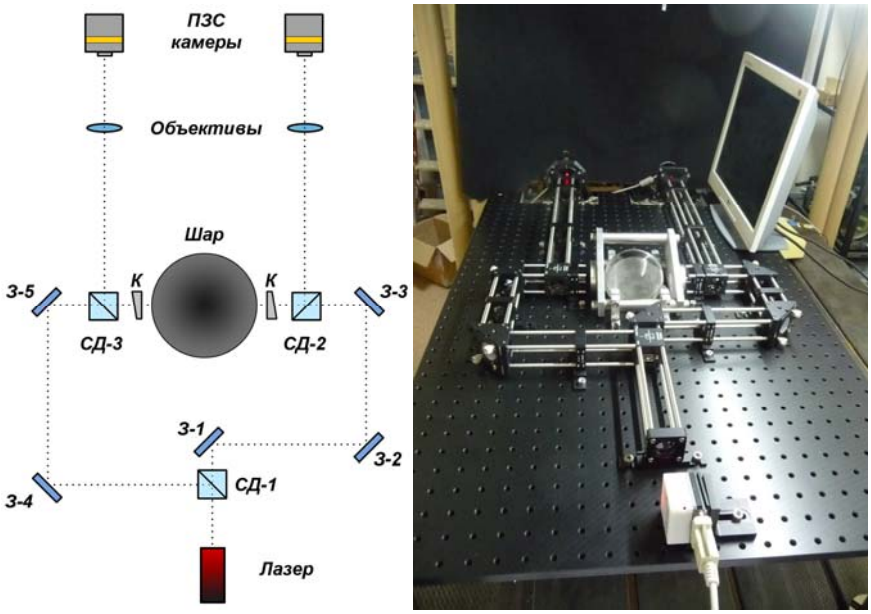


Рис. 1. Интерферометр Саундерса

В настоящей работе идея Саундерса получила дальнейшее развитие. Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 2. 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. Отличие от схемы Саундерса заключается в том, что сферическая волна, возникшая после отражения от шара, сразу же коллимируется объективами, поэтому уменьшается влияние дифракции светового пучка при его распространении до плоскости регистрации. Более того, такая конструкция интерферометра позволяет измерять расстояния d_1, d_2 одновременно, поэтому любая механическая нестабильность положения сферы относительно эталона полностью компенсируется.

Для анализа интерференционных полос и реконструкции формы поверхности шара в интерферометре применяется метод «фазовых шагов». В настоящей работе используется метод с изменением длины волны лазерного излучения. Единственным ограничением применения данного метода является необходимость существования исходной разности хода между объектным и опорными пучками. В нашем случае это требование выполняется, т.к. оба интерферометра Физо, образованные эталонными поверхностями основного интерферометра Фабри — Перо и поверхностью шара, являются неравноплечными.

Наиболее просто изменение длины волны можно достичь с помощью лазерных диодов — полупроводниковых твердотельных лазеров с инжекционной накачкой. В них изменение длины волны излучения достигается при изменении тока накачки. Дополнительное изменение длины волны достигается с помощью внешнего резонатора в виде дифракционной решетки. Поворот решетки с помощью пьезоэлемента ведет также к дополнительному изменению длины волны. В экспериментальном образце лазерного интерферометра используется диодный лазер с внешним резонатором ECDL-6415R российской фирмы ООО «КДП». Данный лазер является источником перестраиваемого высококогерентного излучения в видимой области оптического спектра. Центральная длина волны рабочего диапазона равна 638 нм. При этом возможна ее отстройка на 2 нм, как в коротковолновую, так и в длинноволновую сторону.



СД-1 — СД-3 — светоделительные кубики; З-1 — З-5 — поворотные зеркала;
К — оптические клинья с эталонной плоской поверхностью.
Рис. 2. Оптическая схема и фотография лазерного интерферометра для измерения диаметра кремниевого шара

Для интерферометра Фабри — Перо с базовым расстоянием $D = 30$ мм изменение частоты на 5 ГГц ведет к сдвигу фазы на 2π. Увеличение базового расстояния D интерферометра ведет к уменьшению диапазона перестройки частоты лазерного излучения. Оценки показывают, что длина волны излучения лазера при сдвиге частоты на 5 ГГц изменяется лишь на 0,007 нм. Это означает, что вклад непостоянства длины волны излучения в погрешность измерений диаметра шара очень мал.

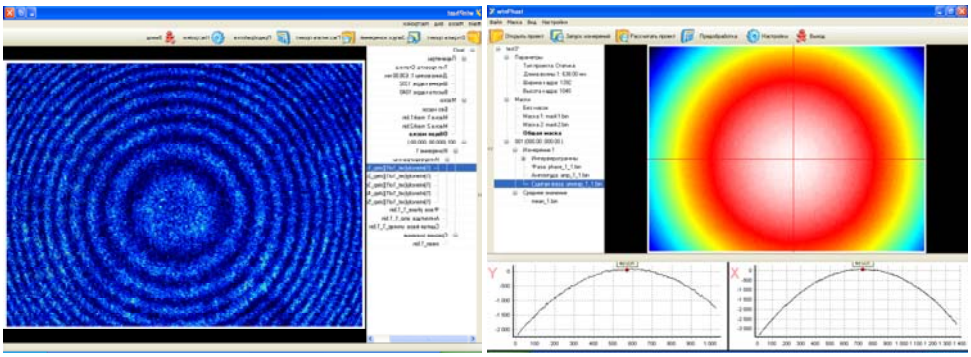


Рис. 3. Интерферограмма и восстановленный профиль волнового фронта пучка, отраженного от поверхности стеклянного шара

Экспериментальный образец лазерного интерферометра (рис. 2) был собран из оптико-механических узлов кейдж-системы, размером 30 мм, оптика диаметром 1″, фирмы Thorlabs. Эта система обеспечивает жесткость конструкции и легкость юстировки (центровки) оптических элементов интерферометра. Основной оптический узел лазерного интерферометра — это интерферометр Фабри — Перо, внутри которого размещается исследуемый шар. Основное требование к данному интерферометру состоит в неизменности базового расстояния между эталонными поверхностями при изменении температуры окружающей среды. Для выполнения данного требования при изготовлении интерферометра используются материалы с низким коэффициентом теплового расширения, например, ситалл или инвар.

В работе были разработаны и изготовлены два варианта интерферометра Фабри — Перо из цельного куска ситалла и конструкция из инваровых стержней. В качестве объекта использовался стеклянный шар. Интерферограмма и восстановленный профиль волнового фронта пучка, отраженного от поверхности стеклянного шара, приведены на рис. 3.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.625.21.0004 от 25.08.2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI62514X0004).

Источники

[1] Saunders J.B. Ball and Cylinder Interferometer // Journal of Research of the Notional Bureau of Standards — C. Engineering and Instrumentation. — 1972. — Vol. 76C. — №1, 2. — P. 11–20.

Saunder's interferometer with a flat etalon to measurement the diameter of silicon sphere

G.N. Vishnyakov, G.G. Levin, V.L. Minaev
FSUE "Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements", Moscow, Russia

To redefine the kilogram, intensive research has therefore been conducted at the national metrology institutes involved in the International Avogadro Coordination Project. In this project, an isotopically enriched ^{28}Si crystal was prepared for the fundamental reduction in the uncertainty in the molar mass measurement, which was the most dominant uncertainty source in the previous determination of the Avogadro constant. Accurate determination of the Avogadro constant will make it possible to redefine the kilogram on the basis of atomic masses.

The first non-contact measurement of the diameter and volume of the sphere was carried out with the ball and cylinder interferometer by Saunders [1]. Two wedge-shaped optical flats with diameter of about that of the sphere are assembled to form a Fabry — Perot etalon with the aid of precise spacers. The distance between the plates is larger than the sphere's diameter by a few millimetres, so that the sphere can be incorporated. The etalon spacing has been determined by photographic evaluation of the interference patterns of the four Hg lines. With the sphere in the etalon, the interferometer is illuminated with laser light. Newtonian rings are formed due to interference between the surface of the sphere and the neighbouring Fabry — Perot plate. The sum of the two distances of both sides can be evaluated by polynomial fitting of the interference ring profile. This method thus allowed the diameter of the sphere perpendicular to the etalon plates to be determined.

We demonstrate a new method of determining the diameter using a flat interferometer, which yields more and particular information about the resulting volume.

Funding. Ministry of Education and Science of the Russian Federation (14.625.21.0004 25.08.2014, RFMEFI62514X0004).

References

[1] Saunders J. B. Ball and Cylinder Interferometer // Journal of Research of the Notional Bureau of Standards — C. Engineering and Instrumentation. — 1972. — Vol. 76C. — №1 and 2. — P. 11–20.

5.3 Двусторонний интерферометр для контроля концевых мер длины с голографическим оптическим элементом

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

Концевые меры длины являются материальным носителем размера и применяются для хранения и воспроизведения единицы длины, для поверки и калибровки измерительных приборов. Расстояние между двумя измерительными поверхностями концевой меры длины должно быть измерено с высокой точностью, которая для мер 1-го разряда составляет 20 нанометров. Для измерения применяются интерферометры, использующие притирку концевой меры одной из измерительных поверхностей к вспомогательной пластине. Длина концевой меры определяется по интерференции света, отражённого от верхней измерительной поверхности концевой меры и от вспомогательной пластины. Операция притирки снижает точность измерения длины меры из-за образования притирочного слоя между измерительной поверхностью меры и поверхностью вспомогательной пластины, снижает производительность процесса измерения и при многократном повторении повреждает измерительные поверхности меры.

Данные недостатки отсутствует у двустороннего интерферометр, у которого длина концевой меры определяется по интерференции света, отражённого от двух измерительных поверхностей меры. Однако, двусторонний интерферометр в виде прибора до сих пор не создан. В настоящее время двусторонние интерферометры существуют лишь в виде двух лабораторных установок [1, 2].

В настоящем сообщении рассматривается оптическая схема двустороннего интерферометра [3], позволяющая создать интерферометр меньших габаритов и более дешёвый, чем ранее предложенные схемы [4—8].

В качестве источников излучения в интерферометре используются два лазера со стабилизированной частотой излучения 1 и 2. Один из лазеров излучает на длине волны 632 нм, другой на 532 нм.

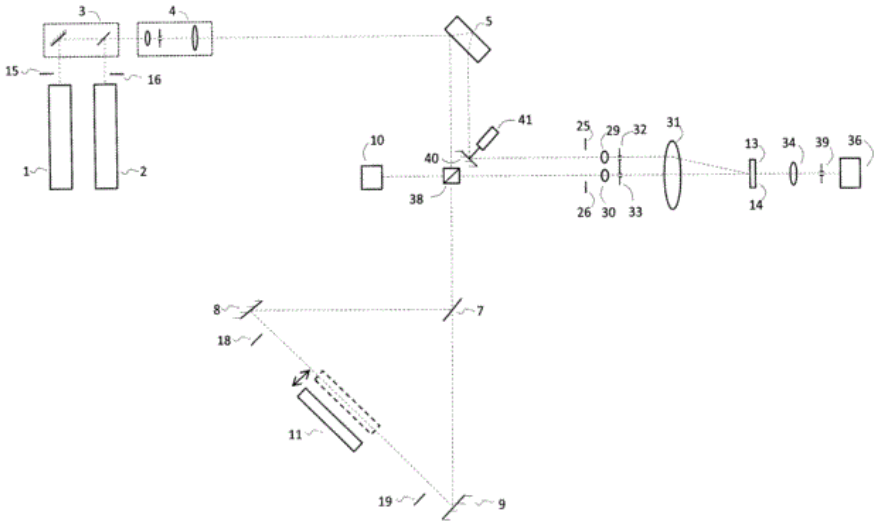


Рис. 1

Излучение лазеров поступает в расширитель пучка 4, выйдя из которого делится светоделительным зеркалом 5 на два пучка — сигнальный и опорный. Сигнальный пучок падает на светоделительную призму 38, при этом часть пучка отражается призмой на фотодиод 10, измеряющий интенсивность излучения лазеров, часть пучка проходит через призму и поступает в трёхзеркальный кольцевой интерферометр, состоящий из зеркал 7, 8, 9 где делится на два пучка, один из которых распространяется в кольцевом интерферометре по часовой стрелки, другой против часовой стрелки. Выйдя из кольцевого интерферометра, сигнальный пучок отражается светоделительной призмой 38 в устройство освещения голограмм, состоящее из линз 29, 30, 31 и диафрагм 32, 33. В устройство освещения голограмм также поступает опорный пучок, отражённый зеркалом 40. Устройство освещения голограмм формирует из входящих в него сигнального и опорного световых пучков два пучка, освещающие наложенные голограммы 13 и 14, образующие голографический оптический элемент. Каждая из наложенных голограмм получена путём экспонирования регистрирующей среды двумя световыми пучками, выходящими из устройства освещения голограмм. Одна голограмма записана излучением одного лазера, другая излучением другого лазера.

В процессе измерения две наложенные голограммы поочерёдно освещаются излучением двух лазеров. Для пропускания излучения одного лазера и перекрытия излучения другого лазера используются затворы 15, 16. Световые пучки, освещающие голограммы 13, 14, в первых порядках дифракции голограмм восстанавливают друг друга.

В результате вдоль оптической оси распространяется сигнальная волна нулевого порядка дифракции голограммы и сигнальная волна, восстановленная опорной волной в первом порядке голограммы. Две сигнальные волны интерферируют, образуя картину интерференции в виде полосы бесконечной ширины. Интенсивность картины интерференции измеряется с помощью линзы 34, диафрагмы 39 и фотоприёмника 36. Линза 34 проецирует изображение измерительных поверхностей меры на фотоприёмник, диафрагма 39 блокирует световые пучки, возникающие при дифракции на той наложенной голограмме, которая записана не на той длине волны, на которой выполняется измерение в данный момент времени.

Для измерения длины концевой меры выполняется три измерения фазы сигнальной волны. Первое измерение выполняется, когда сигнальная волна отражается от одной измерительной поверхности меры 11, установленной в кольцевом интерферометре, второе измерение, когда сигнальная волна отражается от другой измерительной поверхности меры. Для измерения при отражении от той или иной измерительных поверхностей используются затворы 18, 19. Третье измерение выполняется, когда концевая мера 11 выведена из кольцевого интерферометра.

Фаза сигнальной волны находится по интенсивности интерференционной картины при дискретном изменении фазы опорной волны, при перемещении зеркала 40 пьезоактюатором 41. Характерная особенность данного интерферометра состоит в том, что небольшие искажения волнового фронта световых волн, обусловленные несовершенством оптических элементов интерферометра, не влияют на результат измерения. Оптическая схема интерферометра исследована на лабораторном макете интерферометра. Диаметр световых пучков, распространявшихся в интерферометре, составил 5 мм, что обеспечило небольшие габариты интерферометра.

Источники

[1] Kuriyama Y. Development of a New Interferometric Measurement System for Determining the Main Characteristics of Gauge Blocks / Y. Kuriyama, Y. Yokoyama, Y. Ishii, J. Ishikawa // Annals of the CIRP. — 2006. — Vol. 55. — P. 663–666.

[2] Abdelaty A. Challenges on double ended gauge block interferometry unveiled by the study of a prototype at PTB / A. Abdelaty, A. Walkov, P. Franke, and R. Schödel // Metrologia. — 2012. — 49. — P. 307–314.
[3] Патент №2557861 РФ / В.В. Орлов. — 04.03.2014.
[4] Ishii Y. Phase Correction in Measurement of Gauge Blocks Using a New Double-ended Interferometer // SPIE Proc. — 1998. — Vol. 3477. — P. 173–180.
[5] Ishii Y. New method for interferometric measurement of gauge blocks without wringing onto platen / Y. Ishii, S. Seino // Metrologia. — 1998. — 35, P. 67–63.
[6] Khavinson V.M. Ring interferometer for tow-sided measurement of the absolute lengths of end standards // Applied Optics. — 1999. — Vol. 38. — №1. — P. 126–135.
[7] Патент №2005121564 JP. — 12.05.2005.
[8] Lu S.-H. Measuring the thickness of opaque plane-parallel parts using external cavity diode laser and a double-ended interferometer / S.-H. Lu, C.-I Chiueh, C.-C. Lee // Optics Communications. — 2003. — 226. — P. 7–13.

Double-ended interferometer with a holographic optical element for measurement of gauge blocks

V.V. Orlov
Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

The original optical scheme of the double-ended interferometer for measurement of gauge blocks is created. The optical scheme is investigated on the laboratory setup of the interferometer and patent RU2557681 on the optical scheme is received. The double-ended interferometer created according to this optical scheme has the following features:

- The result of measurement is unaffected by the distortions of a phase of light waves caused by imperfection of optical elements of the interferometer.
- The interference pattern is a fringe of infinite width.
- Light beams have diameter 5 mm.
- In the interferometer the holographic optical element is used.
- In the interferometer two frequency stabilized lasers are used. One laser with radiation wavelength $\lambda = 632$ nm, another with $\lambda = 532$ nm.

In comparison with known optical schemes this scheme allows to create the interferometer of smaller dimensions, smaller cost and simpler in an adjustment.

5.4 Распознавание изображений, подвергнутых искажениям геометрии, с помощью составных голографических фильтров для оптико-электронных корреляторов

П.А. Иванов
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

Одной из наиболее быстроразвивающихся в последнее время областей квантовой электроники является оптическая обработка информации. Среди широкого круга задач, имеющихся в данной области, весьма актуальной является задача распознавания изображений, подвергнутых преобразованиям геометрии (поворот, сдвиг, изменение масштаба, различные искажения формы распознаваемого объекта и т.п.). Довольно популярным и привлекательным решением является применение оптикоэлектронных корреляторов изображений [1]. Такой подход актуален, прежде всего, в связи с естественностью осуществления операций типа свертка/корреляция в оптике, наличием большого разнообразия фотоприемных устройств, разработанность технологий устройств ввода данных в оптикоэлектронную систему (таких, например, как пространственно-временной модулятор света), а также средств пост- и предобработки данных (ПЭВМ, спецпроцессоры и др.).

Схемотехника оптикоэлектронных когерентных корреляторов изображений хорошо известна, наиболее популярны реализации в виде 4*f* схемы (схемы Ван-дер-Люгта), коррелятора совместного преобразования, акустооптического коррелятора, а также модификаций указанных схем в зависимости от решаемой задачи [1, 5]. Тем не менее, вне зависимости от выбранного схемотехнического решения, основной функцией данного устройства является вычисление корреляционной функции входных данных с эталонным объектом, реализованным в виде голографического фильтра. Возникает вопрос о выборе указанного эталонного объекта.

К сожалению, выбор в качестве эталона оригинала распознаваемого изображения является крайне неудачным. При корреляционном распознавании изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям (а в естественных условиях, например, при аэрофотосъемке, таковые есть всегда), выходной корреляционный пик резко деградирует при самых малейших изменениях геометрии распознаваемого объекта (за исключением преобразования сдвига, т.к. корреляционная функция обладает автоматической инвариантностью к этому типу преобразований). Довольно привлекательным и популярным вариантом выбора эталона является применение составного инвариантного корреляционного фильтра [2].

В настоящее время исследования в области создания и применения инвариантных корреляционных фильтров ведутся в большом количестве российских и зарубежных научных лабораториях и центров, тем не менее, универсального решения в этой области на настоящий день не найдено. Основные исследуемые на сегодняшний день алгоритмы синтеза корреляционных фильтров относятся к следующим реализациям [2]:

- Алгоритмы на основе разложений входных данных в функциональные ряды (например, разложение по радиальным гармоникам Меллина, фильтр с линейными фазовыми коэффициентами и т.д.)
- Алгоритмы синтеза составных фильтров на основе вычисления оптимизационного параметра (МСЭК, ГМСЭК-фильтры и т.д.).

- Алгоритмы, в основе которых лежит синтез фильтра на основе ядер интегральных преобразований (DCCF и т.д.).

К сожалению, на сегодняшний день невозможно указать оптимального с точки зрения качественных и количественных характеристик корреляционного пика алгоритмов, все они имеют свои недостатки. Поэтому, как правило, применяют тот или иной подход, в зависимости от типа решаемой задачи.

Весьма привлекательным подходом для решения задач распознавания изображений, подвергнутых преобразованиям геометрии, являются алгоритмы синтеза фильтров на основе вычисления оптимизационного параметра, в первую очередь, фильтров с минимальной средней энергией корреляции (МСЭК) и их модификаций [3]. Данное решение привлекательно с двух точек зрения: во-первых, вычисление минимума средней энергией корреляции дает, естественно, корреляционный пик с наиболее возможной остротой, что крайне актуально с точки зрения локализации распознаваемого объекта (т.е. определения его местонахождения на поданной на вход сцене с наибольшей точностью), во-вторых, поскольку алгоритм синтеза, в силу способа построения, позволяет получить целое семейство фильтров, то он сравнительно легко может быть подвергнут модификации, что позволяет улучшать результаты, сужая класс задачи распознавания до рассматриваемого случая.

Исходными объектами исследования, на основе которых были синтезированы указанные фильтры, были выбраны изображения типа «самолет», подвергнутых преобразованиям поворота (поворот в плоскости на углы от 0° до 355° с шагом в 5°, 10° и 15° соответственно, всего 72, 36 и 24 исходных изображения) и изменения масштаба (изменение масштаба в сторону уменьшения/увеличения оригинального изображения при угле поворота 0° с шагом в 1% и 2%, соответственно, всего 90, 55, 45, и 27 исходных изображений для изменения масштаба в ту или иную сторону). Разрешения исходных изображений — 64×64 (высокое разрешение) и 32×32 (низкое разрешение). На основе указанных баз данных исходных изображений синтезировались на ПЭВМ фильтры и вычислялись корреляции фильтров со всей базой данных, которая принималась за базу входных изображений (для преобразования поворота — 72 изображения с шагом в 5°, для каждого разрешения и каждого из 3-х МСЭК-фильтров раздельно; для преобразования изменения масштаба — 90 изображений с шагом 1% в каждую сторону и для каждого разрешения — раздельно).

В качестве среды моделирования был выбран пакет Matlab Mathworks, как наиболее подходящий для подобного рода задач. Для каждого случая вычислялись значения корреляционных функций (1), нормированных на величину максимального пика (количественные характеристики корреляции)

$$C(x_c, y_c) = \iint\limits_{\pm\infty} f^*_{\text{Эт}} f_{\text{Вх}}(x - x_c, y - y_c)\,dx\,dy. \qquad (1)$$

Здесь * обозначает комплексное сопряжение, $f_{\text{Эт}}$ и $f_{\text{Вх}}$ — эталонное (фильтр) и входное изображения, соответственно. Характерная картина зависимостей нормированной величины корреляционного пика от угла поворота входного изображения и величины изменения масштаба представлены на рис. 2 и 3, соответственно.

Также вычислялись значения величин отношений пика корреляции к отклонению от среднего (по фону корреляционной картины), и пика корреляции к среднеквадратическому отклонению от среднего (по фону корреляционной картины), которые обозначены как П/СР и П/СР_КВ, соответственно (качественные характеристики пика). Изображение считалось распознанным по значению порога, который принимался равным 0,5 от максимальной величины пика корреляции, как это принято, например, в [3].

Результаты проведенного моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- Отмечен рост количественных и качественных характеристик корреляции с ростом разрешения. Однако, к сожалению, данный результат достигается за счет значительного увеличения машинного времени, необходимого на синтез фильтров и расчет корреляционной функции.

- Имеют место удовлетворительные результаты в случае распознавания изображений, подвергнутых преобразованию поворота в плоскости, при шаге угла поворота исходного изображения до 10°. При больших значениях угла поворота отмечено существенное ухудшение результатов (так, при шаге 15° имеет место 35 ошибок распознавания при высоком разрешении для входной базы из 72 изображений, что, безусловно, неудовлетворительно). Тем не менее, на взгляд автора, несмотря на удовлетворительные результаты при поворотах до 10°, следует крайне осторожно использовать составные фильтры для данного типа задач, т.к. качественные характеристики пика невысоки.

- Имеют место очень хорошие результаты для распознавания изображений, подвергнутых преобразованию изменения масштаба, особенно в сторону его уменьшения. С учетом того факта, что свертка/корреляция автоматически обладает инвариантностью к сдвигу распознаваемого объекта, результаты моделирования позволяют надеяться на успешное применение составных фильтров (прежде всего, MINACE) для подобного класса задач.

Источники

[1] Евтихиев Н.Н. Информационная оптика. / Н.Н. Евтихиев и др. — М.: Издательство МЭИ, 2000. — 360 с.
[2] Vijaya Kumar B.V.K. Tutorial survey of composite filter design for optical correlators // Appl. Opt. — 1992. — №31. — P. 47–73.
[3] Ivanov P.A. Comparison of correlation peaks characteristics for scaled images recognition using MACE, GMACE and MINACE filters // SPIE Proc. — 2013. — Vol. 8748. — P. 8748ON1.
[4] Evtikhiev N.N. Invariant correlation filters design in problems of image recognition / N.N. Evtikhiev, P.A. Ivanov, R.S. Starikov // Proc. SPIE. — 2002. — Vol. 5129. — p. 92–99.
[5] Evtikhiev N.N. Experiments on realization of wavelet transform based on architecture of hybrid optoelectronic chip / N.N. Evtikhiev, P.A. Ivanov, A.V. Kamensky, R.S. Starikov, M.I. Zabulonov // Optical memory & neural network. — 2002. — Vol. 11. — №1. — P. 39–43.
[6] Ivanov P.A. Invariant correlation filters with peak stability parameter in problems of scaled objects recognition // SPIE Proc. — 2015. — Vol. 9477. — P. 9477OA1.

Recognition of geometrically distorted images using composite holographic filters for optoelectronic correlators

P.A. Ivanov
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

In introduction there is pointed an object of investigation-coherent optoelectronic correlator of images that is used for problems of correlation recognition of objects with geometrical distortions. It is mentioned that usage of initial (original) images as etalons results in serious correlation peak degradation and because of that reason the invariant correlation filters in problems of coherent wave fronts formation are used.

The aim of presented work is the investigation of different types (MACE, GMACE, MINACE) of invariant correlation filters for coherent wave fronts formation and PC modeling of recognition of objects that are under distortions of change of scale and rotation with the help of mentioned filters.

In the main part of paper there are described main often used types of algorithms of synthesis of correlation filters, its properties, positive and negative sides. There are choused 3 basic types of correlation filters, original algorithms of its synthesis are realized, analytical view is shown for presented object to recognize that are united to database based on done analysis of filters.

There was hold a comparison of results of PC modeling of correlation functions and some characteristics of correlation fields calculation that were done for correlations of recognized objects with all synthesized filters. It is shown that best results (as for quantitative and for qualitative correlation peak's characteristics) are reached in case of usage of MINACE filter for change of scale distortion.

It is pointed in conclusion that results of investigation give a possibility of correlation filter's usage for recognition of images with change of scale distortion. But in case of rotation distortion, especially on big angles of rotation it's better to use other methods.

The results can be implemented for problems of aero navigation and machine vision.

5.5 Голографическое исследование пароплазменного облака, формирующегося при лазерно-плазменной обработке образца, находящегося в жидкости

С.В. Васильев, А.Ю. Иванов, А.В. Копыцкий
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы

Экспериментально исследован процесс формирования парогазового образования у поверхности облучаемого металла. Исследованы особенности изменения формы и размеры парогазового «пузыря» на разных стадиях процесса, в т.ч. и после завершения лазерной обработки материала. Показано, что при использовании излучения лазера ГОР-100М, работающего в режиме свободной генерации (длительность импульса ≈1,2 мс, плотность потока ≈10^6 Вт/см^2), форма поверхности кратера, формирующегося на поверхности облучаемого образца, расположенного в воде, принципиально отличается от топографии лунки, сформировавшейся в результате воздействия лазерного импульса с теми же параметрами на аналогичный образец, окруженный воздухом при нормальном давлении (10^5 Па). Показано, что существенное отличие формы поверхности кратера, сформировавшегося в результате воздействия лазерного импульса с одинаковыми параметрами на одинаковые образцы, окруженные воздухом и водой, определяется принципиально различным характером течения плазмы и парогазовой смеси в указанных случаях.

Введение

В наши дни заложены основные представления о механизмах разрушения твердых тел, находящихся в газовой среде, лазерным излучением с плотностью потока ≈10^5–10^6 Вт/см^2. Целью данной работы является исследование процессов, протекающих вблизи мишени при воздействии излучения импульсного лазера с плотностью потока ≈10^6 Вт/см^2 на металлический образец, расположенный в воде.

Методика исследований и экспериментальная установка

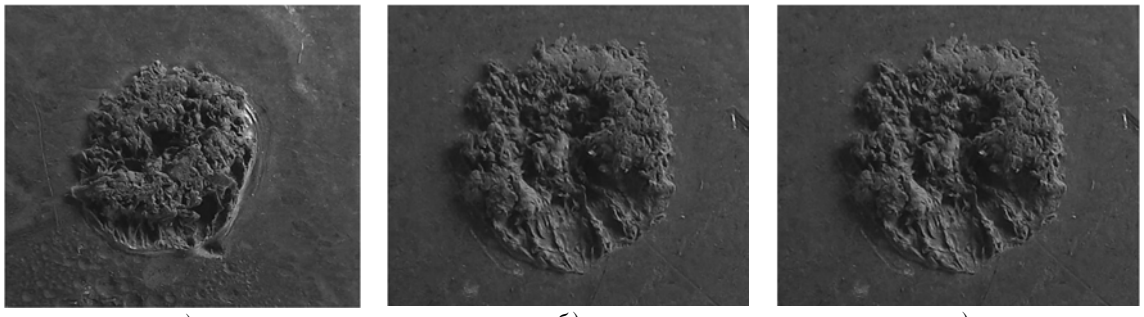
Излучение рубинового лазера ГОР-100М, работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau \approx 1{,}2$ мс, длина волны $\lambda = 0{,}694$ мкм), пройдя через фокусирующую систему, направлялось на образец, располагавшийся в кювете с водой. В качестве фокусирующих применялись как однолинзовые, так и двухлинзовые системы, которые позволяли строить изображение диафрагмы на поверхности образца. Это позволяло получать на поверхности мишени однородное пятно фокусировки излучения с резкими границами. Диаметр D полученного таким образом пятна излучения с резкими краями варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм.

Часть (≈4%) лазерного излучения (далее — ЛИ) направлялась передней гранью стеклянного клина в измеритель энергии ИМО-2Н, входной зрачок которого был расположен в фокальной плоскости линзы 7. Энергия лазерных импульсов E0 варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж. Коаксиальный фотоэлемент ФЭК-14, сигнал с которого подавался на вход осциллографа С8-13, использовался для регистрации временной формы лазерного импульса.

Для изучения пространственной и временной эволюции лазерного факела в ходе воздействия ЛИ на образец использовался метод скоростной голографической киносъемки [1]. Межэлектродный промежуток помещался в одно из плеч интерферометра Маха — Цендера. Интерферометр освещался излучением рубинового лазера ($\lambda = 0{,}694$ мкм), работавшего в

режиме свободной генерации. Длительность импульса излучения зондирующего лазера составляла ≈400 мкс. Селекция поперечных мод зондирующего лазера осуществлялась диафрагмой, помещенной внутрь резонатора, а продольных — эталоном Фабри — Перо, использовавшимся в качестве выходного зеркала. Зондирующее излучение направлялось в коллиматор, позволявший получать параллельный световой пучок диаметром до 3 см, что позволило наблюдать за развитием пароплазменного облака.

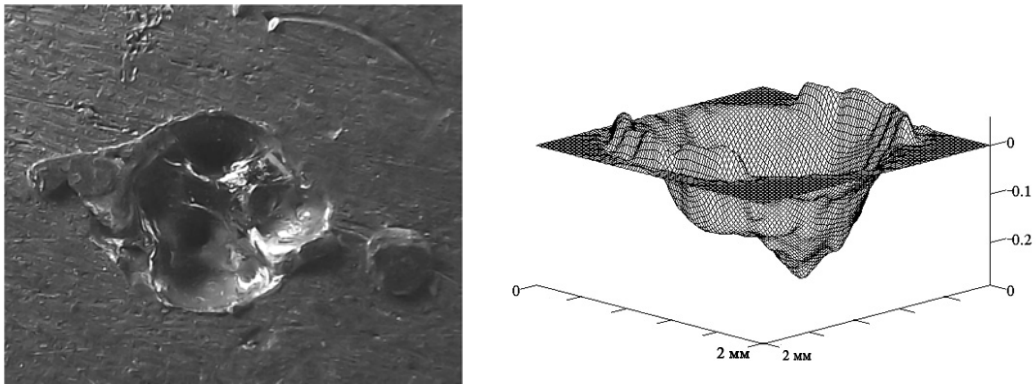
Интерферометр был состыкован со скоростной фоторегистрирующей камерой СФР-1М, плоскость фотопленки в которой была сопряжена с меридиональным сечением воздействующего на образец лазерного луча при помощи объектива. Скоростная камера работала в режиме лупы времени. Описанная схема позволяла регистрировать развернутые во времени голограммы сфокусированного изображения лазерного факела. Полученные отдельные кадры голограмм обеспечивали временное разрешение не хуже 0,8 мкс (время экспозиции одного кадра) и пространственное разрешение по полю объекта ≈50 мкм. Дифракционная эффективность голограмм позволяла в стационарных условиях восстанавливать и регистрировать интерференционные и теневые картины исследуемого процесса.



а) б) в)

Рис. 1. Фотографии кратеров, полученных при воздействии на свинцовый образец, расположенный в воде, лазерных импульсов с энергией 10 Дж (а), 20 Дж (б), 40 Дж (в)

Экспериментальные результаты



а) б)

Рис. 2. Фотография кратера, полученных при воздействии на свинцовый образец, расположенный в воздухе, лазерного импульса с энергией 40 Дж (а) и топограмма кратера (б)

Экспериментальные исследования показали, что топография кратера, полученного при воздействии лазерного излучения на свинцовый образец, погруженный в воду (рис. 1), существенно отличается от формы поверхности кратера, сформировавшегося в результате

воздействия лазерного импульса с теми же параметрами на аналогичный образец, окруженный воздухом при нормальном давлении (10^5 Па, рис. 2).

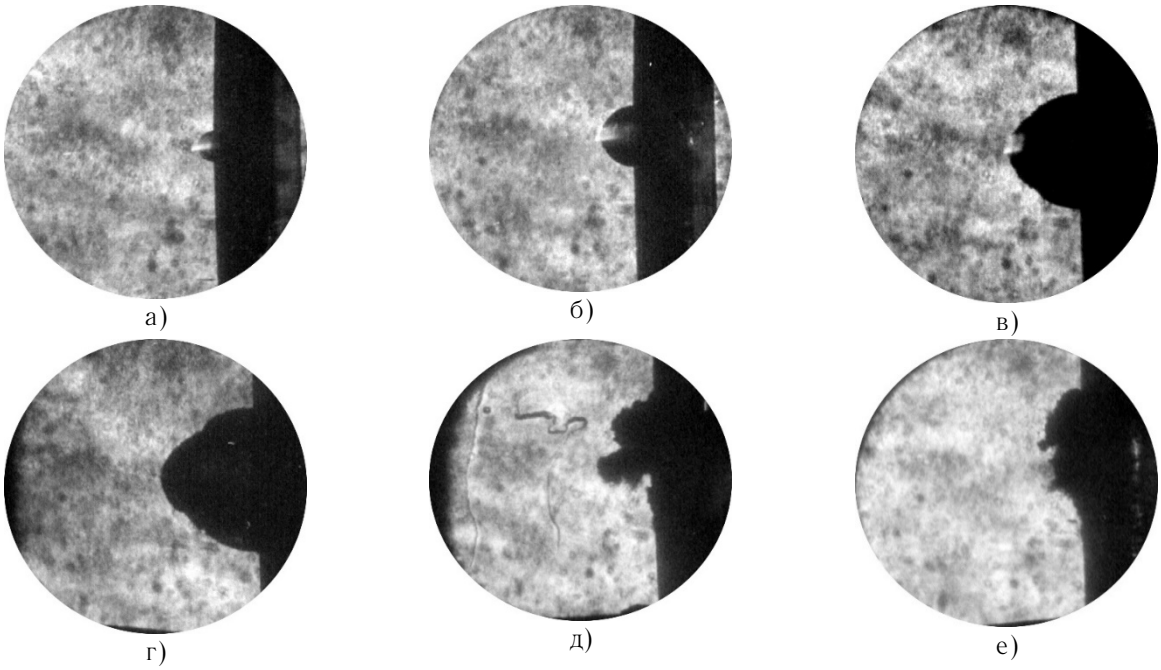


Рис. 3. Теневые картины парогазового образования, зарегистрированные через 10 (а), 50 (б), 500 (в), 1200 (г), 2000 (д), 3000 (е) микросекунд после начала лазерного воздействия на свинцовый образец. Диаметр поля зрения 4 сантиметра.

На рис. 3 представлены теневые картины, восстановленные с голограмм, зарегистрированных описанным методом в различные моменты времени после начала воздействия излучения на вещество. Видно, что у поверхности облучаемого образца формируется парогазовое образование («пузырь»), форма которого первоначально близка к сферической. Образование быстро увеличивается в размерах, особенно на ранних стадиях процесса. Приблизительно через 1 мс после начала воздействия форма «пузыря» начинает изменяться, на оси лазерного пучка формируется выпуклость. После прекращения воздействия (≈1,2 мс) размеры парогазового образования стабилизируются, и только через ≈1,5 мс начинается его медленный распад. Существенно, что при этом не только уменьшаются размеры «пузыря», но и случайным (не повторяющимся от одного эксперимента к другому) образом изменяется его форма. Но даже через 3 мс после начала воздействия лазерного излучения на поверхность металла (то есть через ≈1,8 мс после прекращения воздействия) пароплазменное образование не исчезает.

Обсуждение результатов

Решение системы уравнений движения двухкомпонентной (пары свинца и воды) системы приводит к следующим результатам.

На первой стадии ($t \le 10$ мкс) ввиду высоких плотности и температуры ($T \mid r = r_0 = 7000$ К) продуктов эрозии разлет плазмы подобен наблюдаемому при воздействии лазерного излучения на образец, расположенный в воздухе. Движение продуктов эрозии сверхзвуковое и практически одномерное (вещество радиально разлетается от центра пятна фокусировки излучения). При этом подукты эрозии охлаждаются, испаряя воду. Скорость перемещения границы пароплазменного «пузыря» $\vec{U}_b$ также сверхзвуковая. Из зоны эрозии наблюдается интенсивный вылет капель свинца в конденсированном состоянии.

На второй стадии процесса ($10\ \text{мкс} \le t \le 50\ \text{мкс}$) движение продуктов эрозии по-прежнему сверхзвуковое. Однако на этой стадии масса водяного пара уже значительно превышает массу продуктов эрозии, содержащихся в «пузыре». Скорость перемещения границы пароплазменного «пузыря» $\vec{U}_b$ становится дозвуковой, скорость течения пара $\vec{U}$ также дозвуковая и существенно меньше $\vec{U}_b$, но среднее значение $|\vec{U}|$ постепенно увеличивается. Движение содержимого пузыря по-прежнему практически одномерное. Часть испаренных продуктов эрозии выходят за пределы «пузыря» и образует водяной гель.

На третьей стадии процесса ($50\ \text{мкс} \le t \le 500\ \text{мкс}$) скорости всех компонент, наполняющих «пузырь», становятся дозвуковыми. Их перемещение по-прежнему практически одномерное. Система уравнений движения компонент системы допускает линеаризацию и может быть решена аналитически. Так, например,

$$T(r,t) = \frac{4T_0\,\Delta r}{\pi^3}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(1-(-1)^n)}{n^3}\exp\left(-\left(\frac{\pi n}{\Delta r}\right)A\,t\right)\frac{\sin\left(\frac{\pi n}{\Delta r}r\right)}{r},$$

где $T_0 = T \mid r = r_0$, $\Delta r = r_b - r_0$, $A = \dfrac{\alpha_1+\alpha_2}{\rho_{01}c_{p1}+\rho_{20}c_{p2}}$, $\rho_{01} = \dfrac{\mu_1\,p \mid r = r_b}{R_u\,T \mid r = r_b}$, $\rho_{02} = \dfrac{\mu_2\,p \mid r = r_b}{R_u\,T \mid r = r_b}$.

На четвертой стадии процесса ($t \ge 500\ \text{мкс}$) течение водяного пара перестает быть одномерным. Достигнув границы «пузыря», поток водяного пара идет по касательной парогазового образования к мишени, достигает ее, идет вдоль мишени к центру вплоть до плазменного образования, нагревается и направляется навстречу лучу лазера вместе с продуктами эрозии. Таким образом, поток водяного пара, идущий к центру кратера, не дает вытекать жидкому металлу из лунки и вспенивает его. В зоне соприкосновения «прямого» и «обратного» течений образуются вихри, которые заполняют почти весь объем «пузыря». Этим объясняется случайный (не повторяющимся от одного эксперимента к другому) характер распада парогазового образования.

Заключение

Таким образом, существенно отличие формы поверхности кратера, сформировавшегося в результате воздействия лазерного импульса с одинаковыми параметрами на одинаковые образцы, окруженныей воздухом и водой, определяется принципиально различным характером течения плазмы и парогазовой смеси в указанных случаях.

Источники

[1] Барихин Б.А. Скоростная голографическая киносъемка лазерной плазмы / Б.А. Барихин, А.Ю. Иванов, В.И. Недолугов // Квантовая электроника. — 1990. — Том 17. — №11 — С. 1477–1480.

Holographic study plasma-vapor clouds formed in the laser-plasma treatment of the sample in the liquid

S.V. Vasilev, A.Yu. Ivanov, A.V. Kopytsky
Grodno state university Kupala

Experimentally investigated the formation of steam and gas formation at the surface of the irradiated metal. The features of the changes in the shape and size of the combined-cycle “bubble” at different stages of the process, including after laser material processing.

Стендовые доклады
Секция №1

Технологии в области защитных голограмм

Poster presentations
Section №1

C1.1 Оптический поляризационный прозрачный защитный элемент на основе пигментов с высоким показателем преломления

А.И. Горчарук, П.В. Моисеенко, Л.В. Танин, А.Г. Бобореко
ЗАО «Голографическая индустрия», Минск, Беларусь

В области защитных технологий число методов получения надежных средств защиты с каждым годом растет. Однако одновременно с этим совершенствуются и методы фальсификации, что требует создания более совершенных элементов защиты. Следует также отметить, что не существует оптимального защитного средства, которого было бы невозможно воспроизвести. Лишь в комбинации с различными методами это средство может служить одним из критериев оригинальности защищаемого объекта.

Среди защитных элементов с переменными оптическими свойствами наиболее трудно воспроизводимыми являются элементы, содержащие скрытые изображения, видимые только в поляризованном свете.

Как правило, скрытые поляризованные изображения получаются на поверхности или в объеме полимерного слоя-носителя скрытого изображения в результате формирования оптической анизотропии в локальной области данного полимерного слоя, а именно изменения величины двулучепреломления.

Локальное изменение величины двулучепреломления может быть достигнуто либо вариацией направления оптической анизотропии прозрачного материала в определенных его участках, либо модулированием толщины прозрачного анизотропного материала в определенных участках слоя.

Эти эффекты достигаются путем механического, химического, фотофизического, либо термомеханического воздействий. Во всех этих случаях скрытое поляризованное изображение формируется в предварительно подготовленном специальным образом полимерном слое, либо на поверхности твердой подложки.

Известные способы изготовления скрытого изображения и защитного элемента на его основе предполагают наличие сплошного, как правило, полимерного слоя, несущего скрытое поляризованное изображение, на обратную сторону которого наносится клей, после чего производится вырубка и получается конечный продукт — самоклеющиеся этикетки и метки.

Наиболее близкими по технической сущности к заявляемому способу изготовления оптического защитного элемента является следующие методы.

Известен способ изготовления скрытого изображения с помощью локального механического удаления твердого анизотропного полимерного материала с поверхности жесткой подложки. Однако данный способ приводит к формированию контрастного поляризованного изображения с ясно видимым невооруженным глазом контуром изображения.

Другой метод заключается в том, что на подложку наносят отражающий слой. Впечатывают скрытое изображение. Осуществляют структурирование участка слоя, несущего скрытое изображение на предварительно заданную глубину с обеспечением оптической анизотропии в данном структурированном участке слоя, которая обуславливает обеспечение невидимости изображения при наблюдении его невооруженным глазом и его четкой контрастной видимости при просмотре в поляризованном свете. После этого, по всей поверхности защитного элемента наносят тонкий прозрачный защитный слой. При этом коэффициент преломления защитного слоя, по существу, совпадает с коэффициентом преломления участка слоя, несущего скрытое изображение. Однако, известный способ имеет существенный недостаток, а именно: отражающий слой, согласно данному изобретению,

является непрозрачным для электромагнитных лучей видимого диапазона. В этом случае при нанесении данного защитного элемента на документ, от визуального просмотра скрыта та часть документа, где находится защитный элемент, что снижает защитные функции элемента, так как на этом месте нельзя расположить и, соответственно, защитить оригинальную подпись, например, владельца документа или расположить символы, выполненные люминесцентными красками, которые визуализируются при наличии, например, ультрафиолетового излучения.

Для устранение вышеуказанного недостатка предлагается метод изготовления оптического поляризационного прозрачного защитного элемента на основе пигментов с высоким показателем преломления.

При изготовлении данного защитного элемента берут подложку, которая выполнена из полипропилена или полиэтилентерефталата и на одну из ее поверхностей наносят слой прозрачной полимерной композиции, основу которой составляют оптически прозрачные полимеры из ряда: поликарбонат, полистирол, поливиниловый спирт, нитроцеллюлоза и т.д. При этом показатель преломления данных полимеров находится в пределах 1,5–1,6 единиц. Затем слой прозрачной полимерной композиции структурируют (обрабатывают), например, механическим способом, создавая определенные символы. Такое структурирование могут осуществлять не только механическим способом, но и термомеханическим воздействием игольчатой гребенкой плоттера, или обрабатывать ионным пучком или лазерным излучением. Затем на прозрачную полимерную композицию наносят приготовленную термоактивируемую прозрачную клеевую композицию, включающую, неорганические соединения с показателем преломления равным, по меньшей мере, двум единицам, который в нормальных условиях не обладает адгезией.

Конструкция заявляемого в качестве изобретения оптического поляризационного прозрачного защитного элемента, представленного на рис. 1, включает: подложку 1, слой 2 прозрачной полимерной композиции, включающей оптически изотропные участки 3 и структурированные (оптически анизотропные) участки 4, выполненные в виде определенных символов, а также термоактивируемую прозрачную клеевую композицию 5, содержащую неорганические соединения с показателем преломления равным, по меньшей мере, двум единицам.

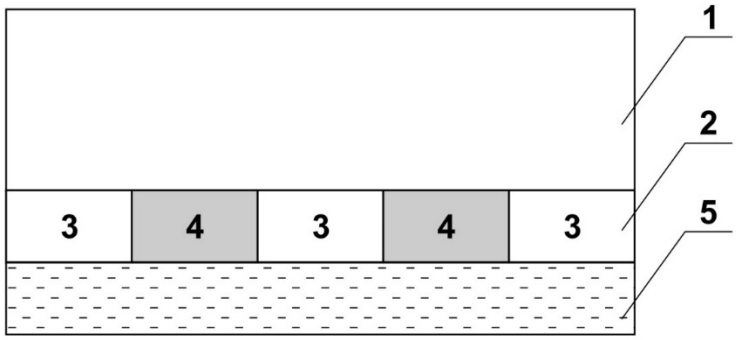


Рис. 1. Структура оптического поляризационного прозрачного защитного элемента

Без поляроида в обычном свете символы, размещенные на оптически анизотропных участках 4 не видны, так как человеческий глаз не различает поляризацию света. Прозрачный защитный элемент позволяет видеть ту часть документа или ценной бумаги, которая находится под защитным элементом.

При наличии циркулярного поляроида (на рисунке не показан), неполяризованный свет от источника проходит циркулярный поляроид и получает круговую поляризацию.

Оптически изотропные участки 3 не изменяют круговую поляризацию света и свет доходит до термоактивируемой прозрачной клеевой композиции, содержащей неорганические соединения с показателем преломления равным, по меньшей мере, двум единицам.

Оптически анизотропные (структурированные) участки 4 из-за двулучепреломления изменяют круговую поляризацию света на эллиптическую и эллиптически поляризованный свет также доходит до термоактивируемой прозрачной клеевой композиции.

Если бы термоактивируемая прозрачная клеевая композиция не включала неорганические соединения с показателем преломления равным, по меньшей мере, двум единицам, то сама полимерная основа термоактивируемой прозрачной клеевой композиции имела бы показатель преломления на уровне 1,5–1,6 единиц, т.е. он не отличался бы от показателя преломления слоя 2 прозрачной полимерной композиции.

В этом случае согласно формуле Френеля интенсивность отраженной волны для параллельной и перпендикулярной поляризаций минимальна и недостаточна для визуализации скрытых изображений, содержащихся в слое 2.

Как показывает практика, для обеспечения четкого контрастного зрительного восприятия визуализируемых с помощью циркулярного поляроида скрытых изображений, содержащихся на участках 4 (анизотропных), необходимо, чтобы коэффициент отражения от границы раздела слоя 2 прозрачной полимерной композиции с $n_1 = 1{,}5$ и слоя 5 термоактивируемой прозрачной клеевой композиции был при перпендикулярном падении светового луча не менее 2%.

Это возможно, если разница в показателях преломления слоев 2 и 5 составляет, по меньшей мере 0,5 единиц, т.е. слой 5 должен иметь, как минимум $n_2 = 2$. Тогда согласно формуле Френеля при перпендикулярном падении луча на границу раздела двух сред (слоев 2 и 5, рис. 1) коэффициент отражения R равен

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} = \frac{0{,}5^2}{3{,}5^2} = 0{,}0204 = 2\%.$$

Добавка в термоактивируемую прозрачную клеевую композицию неорганических соединений с показателем преломления равным, по меньшей мере, двум единицам доводит коэффициент отражения от границы раздела слоев 2 и 5 до нужной нам величины.

Вернемся к анализу поведения поляризованного света при отражении от границы раздела двух диэлектриков — прозрачной полимерной композиции, т.е. слоя 2 с оптически изотропными участками 3 и оптически анизотропными участками 4 (показатель преломления $n_1 = 1{,}5$) и термоактивируемой прозрачной клеевой композиции, т.е. слоя 5 ($n_2 = 2{,}0$).

Эллиптически поляризованный свет, полученный после прохождения анизотропных участков 4, отражается от границы слоев 2 и 5 с достаточной интенсивностью и выходит из поляроида, т.е. эти участки, где размещены символы, будут светлыми.

Свет с круговой поляризацией, характерный для изотропных участков 3, также отражается от границы слоев 2 и 5, но в силу изменения фазы на 180° получает другое направление вращения вектора электрической напряженности, что приводит к тому, что после прохождения четвертьволновой пластины циркулярного поляроида линейная поляризация света не совпадает с плоскостью пропускания поляроида.

Следовательно, изотропные участки 3, т.е. фон, являются темными. Таким образом, скрытые изображения (символы), размещенные только на участках 4 визуализируются за счет контраста.

Данный оптический поляризационный прозрачный защитный элемент позволяет существенно повысить защиту от подделки различных видов продукции и ценных бумаг.

Optical polarizing transparent protective element based on pigments of high refractive index

A.I. Gorcharuk, P.V. Moiseenko, L.V. Tanin, A.G. Boboreko
CJSC "Holography industry", Minsk, Belarus

The number of methods for obtaining secure protection is increasing every year in the area of protect technologies. However, the methods of falsification is improving at the same time and this fact requires the creation of more advanced security elements. It should be noted, there are no optimal security means which couldn't be reproduced. These means can be as one of the criteria of originality of the protected object only in combination with different security methods.

The elements containing hidden images which is visible only in polarized light are the most difficult reproducible ones among security elements with variable optical properties.

Generally, the hidden polarized images are available on the surface or in the volume of the polymer layer-carrier of the latent image by forming an optical anisotropy in the local area of this polymer layer, namely by changing the magnitude of birefringence.

Local change of the value of birefringence can be achieved by the variation of the direction of transparent material optical anisotropy in its specific areas or by modulating of transparent anisotropic material thickness in certain parts of the layer.

These effects are achieved by mechanical, chemical, photophysical or thermomechanical effects. The latent polarized image is formed in a specially prepared polymer layer or on the surface of a solid supporting surface.

Known methods of producing a latent image and the security element on its base assume the presence of the whole, usually polymeric layer, carrying the latent polarized image; the glue is applied on the reverse side of the whole polymeric layer, then cutting comes and the final product is self-adhesive labels and tags.

There is a number of methods closest to the technical nature of the optical security element producing. There is a producing method of latent image using a local mechanical removal of solid anisotropic polymer material from a hard supporting surface. However, this method leads to the formation of the contrast polarized image with the outline clearly visible to the naked eye.

Another method is the application of the reflective layer to the supporting surface and imprinting latent image. Layer part, carrying the latent image on a predetermined depth with providing an optical anisotropy in this part of the layer, is structured. Anisotropy conditions providing invisibility image when it's viewed with the naked eye, and a clear contrast visibility when it's viewed in polarized light. After that, thin transparent protective layer is applicated on the whole surface of the security element. The refraction coefficient of the protective layer substantially coincides with a refraction coefficient of the part of layer carrying the latent image. However, the method has a significant disadvantage, namely, a reflective layer according to the invention is opaque to electromagnetic rays in the visible range. In this case, when the security element is applied to the document, the part of the document is hidden from the visual viewing where the security element is; this reduces the protective functions of the element as the original signature, for example, of the document owner, positioned at this point and thus be protected, or symbols made by luminescent colors, that are rendered in the presence of ultraviolet radiation, cannot be arranged.

For eliminating the drawback mentioned above, the method of manufacturing the optical polarizing transparent protective element based on pigments with high refractive index is proposed

The support material, made of polypropylene or polyethylene terephthalate, is taken to manufacture the protective element and a layer of glasslike polymer composition is applied on one

of its surfaces; the composition is based on optically glasslike polymers from a range of polycarbonate, polystyrene, polyvinyl alcohol, nitrocellulose, etc. The refraction index of these polymers is in over the range 1.5–1.6 units. Then a layer of glasslike polymer composition is structured, for example, by mechanical means, creating certain symbols. Such structuring can be carried out not only mechanically, but also by means of thermo-mechanical impact of the plotter's needle comb, ion beams or laser emission. Then, thermally-activated transparent adhesive composition is applied to the glasslike polymer compound. This thermally-activated transparent adhesive composition includes inorganic compounds with a refractive index equal at least to two units, which has no adhesion in normal conditions.

The construction of a transparent protective polarizing optical element claimed as invention, shown on Fig. 1 includes: a supporting surface 1, a layer 2 of a transparent polymer composition, including optically isotropic parts 3 and structured (optically anisotropic) parts 4, made in the form of certain characters and heat-activated transparent adhesive composition 5, containing inorganic compounds having a refractive index equal to two units at least.

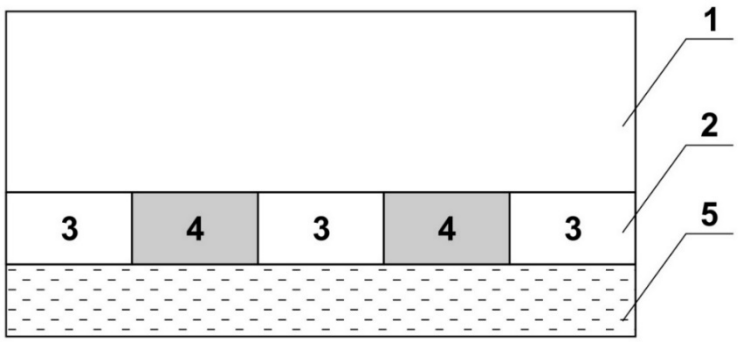


Fig. 1. Structure of the optical polarizing transparent protective element

The symbols placed on the optically anisotropic parts 4 are not visible in normal light without a polaroid, because the human eye cannot distinguish the polarization of light. Transparent protective element allows to see that part of the document or the security paper, which is under the protective element.

If there is a circular polarizer (not shown on the figure), non-polarized light from the source passes circular polaroid and receives a circular polarization. Optically isotropic parts 3 don't change circular polarization of light and the light reaches the activated transparent adhesive composition containing inorganic compound having a refractive index equal to two units at least. The optically anisotropic (structured) parts 4 due to the birefringence change circularly polarized light to an elliptical polarization, and elliptically polarized light also comes to a thermally activated transparent adhesive composition. If the thermally activated transparent adhesive composition didn't include inorganic compounds having a refractive index equal to two units at least, the polymer base of thermally activated transparent adhesive composition would have a refractive index of 1.5–1.6 units, i.e. it wouldn't be different from the refractive index of the layer 2 of the transparent polymer composition.

In this case, the intensity of the reflected wave for parallel and perpendicular polarizations minimal and insufficient to visualize latent images contained in the layer 2, according to the Frenel's formula.

Practice shows that to provide a clear contrast visual perception of visualized latent images using a circular polarizer, which contained on 4 areas (anisotropic), it is necessary, that the reflection coefficient of the reflection from layer 2 surface a transparent polymeric composition

$n_1 = 1{,}5$, and the layer 5 of transparent is thermally activated adhesive composition wasn't less than 2% at perpendicular incidence of the light beam.

It's possible, that the difference in is refractive indexes of layers 2 and 5 is 0.5 units at least, i.e. layer 5 must have $n_2 = 2$ at least. Then according to the Fresnel's formula at normal incidence of the beam on the interface between two substances (layers 2 and 5. Fig. 1), the reflection coefficient R is equal to:

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} = \frac{0{,}5^2}{3{,}5^2} = 0.0204 = 2\%.$$

The addition of inorganic compounds, having a refractive index equal to two units at least, to heat-activated transparent adhesive composition leads to the achievement of the required reflection coefficient from the boundary between the layers 2 and 5.

Let us return to analysis of the polarized light behavior in the reflection from the two dielectrics surfaces: transparent polymer composition, i.e. layer 2 with an optically isotropic parts 3 and an optically anisotropic parts 4 (refractive index $n_1 = 1.5$) and thermally activated transparent adhesive composition, i.e. layer 5 ($n_2 = 2.0$).

Elliptically polarized light, obtained after passing anisotropic parts 4, reflects from the boundary between layers 2 and 5 with a sufficient intensity and leaves the polarizer, i.e. these parts where the symbols are placed, will be bright.

Circularly polarized light typical for isotropic parts 3 is also reflected from the boundary between layers 2 and 5 but due to changing the phase to 180° gets another rotation direction of the electric field vector, which leads to a mismatch linearly light polarization, after passing the quarter-wave plate of a circular polarizer, and polaroid's transmission plane.

Therefore, isotropic parts 3, i.e. background, is dark. Thus, the latent images (symbols) placed only on 4 parts are visualized by contrast.

This optical polarizing transparent protective element allows to increase the protection against forgery of various kinds of products and security papers.

C1.2 Получение новых защитных элементов и визуальных эффектов в многоцветных отражательных защитных голограмм

Д.С. Лушников[1], В.В. Маркин[1], А.Ю. Жердев[1], С.Б. Одиноков[1], А.В. Смирнов[2], Б.В. Акимов[2]
[1] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[2] АО «НПО «Криптен», Дубна, Россия

Россия В статье описаны защитные элементы и визуальные защитные эффекты, используемые в защитных цветных голограммах. В качестве защитных цветных голограмм разрабатывались цветные голограммные стереограммы, работающие на отражение. В качестве защитных элементов использовались цветные микротексты. В качестве визуальных защитных эффектов получались «флип-флоп» эффекты по изображению и цвету при наблюдении изображения, восстанавливаемого с цветной защитной голограммы.

Цветные защитные голограммы получались в виде цветных голограммных стереограмм по двухэтапной технологии. На первичной голограмме выбирались зоны, отвечающие за формирование визуальных защитных эффектов в виде «флип-флоп» эффекты по изображению и цвету. На рис. 1 представлен подобный эффект, который предполагалось получить при регистрации полнопараллаксной цветной голограммной стереограммы «Кубок 2018».

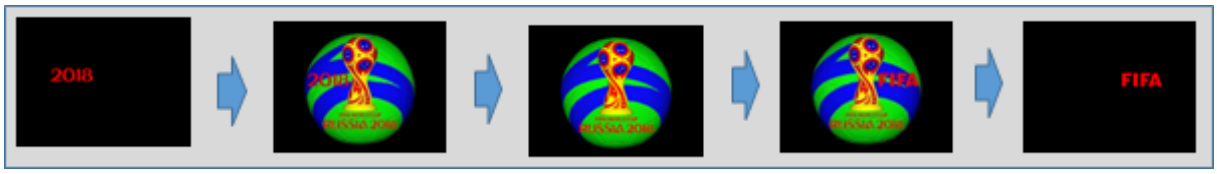


Рис. 1. Предполагаемые «флип-флоп» эффекты по изображению и цвету

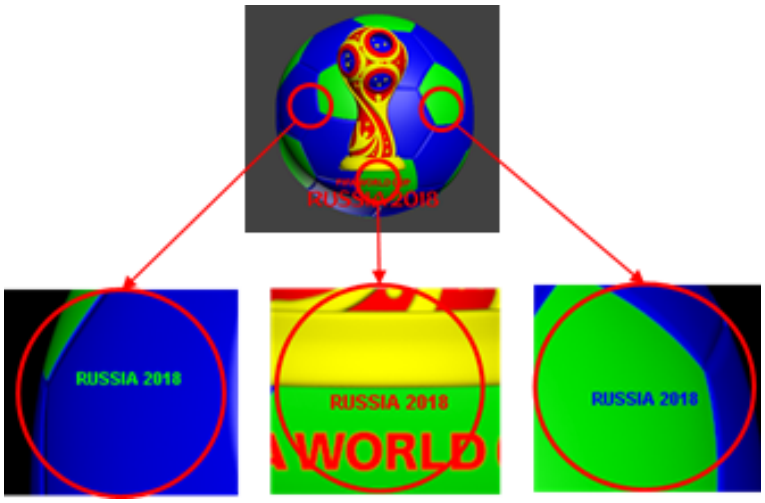
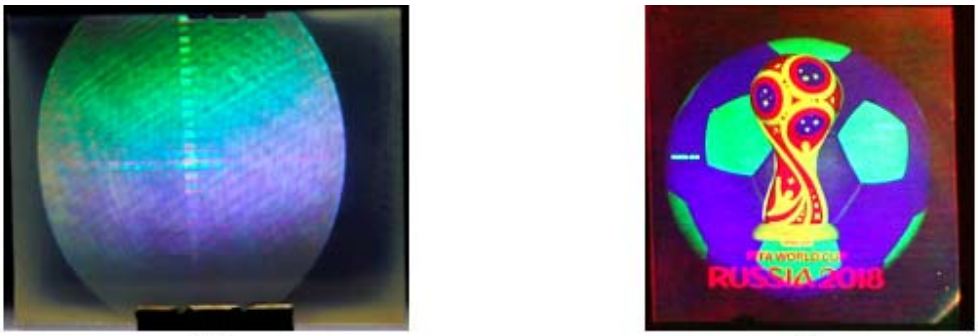


Рис. 2. Предполагаемые защитный элемент в виде цветного микротекста

При этом ракурсы кадров на первичной голограмме H1 регистрировались отдельно от защитных элементов. В качестве цветного микротекста была записана надпись «RUSSIA» различных цветов на различном фоне (рис. 2).

Фотография первичной голограммы H1 представлена на рис. 3а, а на рис. 3б приведена фотография итоговой полнопараллаксной цветной голограммной стереограммы «Кубок 2018» (восстановленного с нее изображения). На рис. 4 приведена фотография восстановленного с

голограммы изображения цветного микротекста, а на рис. 5 представлен визуальный защитный «флип-флоп» эффект по изображению и цвету.



(а) (б)

Рис. 3. Фотография первичной голограммы H1 с микротекстом (а) и фотография итоговой полнопараллаксной цветной голограммной стереограммы «Кубок 2018»

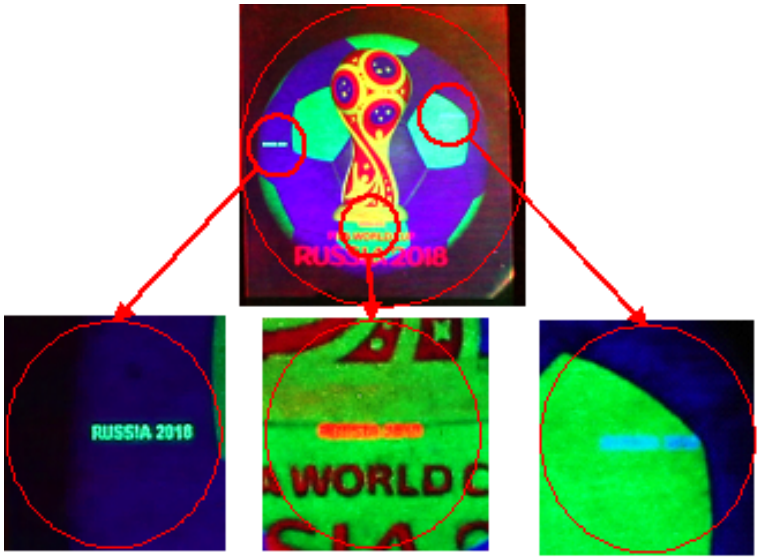


Рис. 4. Фотография восстановленного с полнопараллаксной цветной голограммной стереограммы «Кубок 2018» изображения цветного микротекста

Рис. 5. Фотография визуального защитного «флип-флоп» эффекта по изображению и цвету

Preparation of new security features and visual effects in multicolor reflective security holograms

D.C. Lushnikov[1], V.V. Markin[1], A.Y. Zherdev[1], S.B. Odinokov[1], A.V. Smirnov[2], B.V. Akimov[2]
[1] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[2] JSC "RPC "Krypten", Dubna, Russia

Russian article describes security elements and protective visual effects used in shielding colored holograms. As a protective color holograms developed color holographic stereogram working in reflection. The color microtexts used as protective elements. As a visual protective effects were obtained by "flip-flop" effects in the image and the color of the observation image, recovered with a colored protective hologram.

Colored protective holograms obtained in the form of colored holographic stereogram by a two-stage technology. On the primary hologram chosen area, responsible for the formation of the protective effects of the visual as a "flip-flop" effects in the image and color.

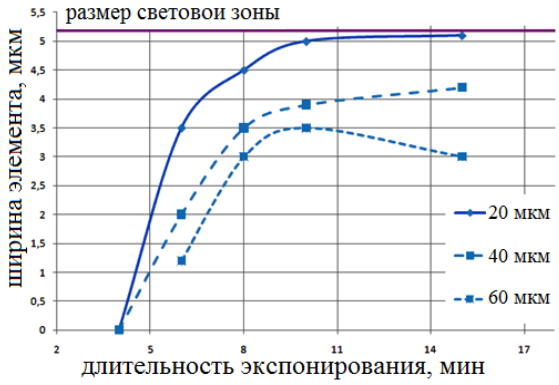
C1.3 Формирование и свойства объемных и гибридных объемно-поверхностных периодических структур и элементов на их основе

Н.Д. Ворзобова, В.О. Веселов
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

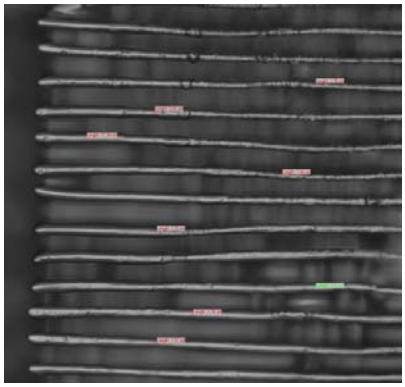
Исследованы особенности формирования и свойств объемных периодических структур и гибридных структур с поверхностным рельефом в толстослойных (100 и более мкм) полимерных слоях. Рассмотрены возможности получения элементов управления световыми пучками и защитных элементов на их основе.

Актуальность проблемы объемного структурирования оптических материалов связана с возможностью создания как нового класса материалов — метаматериалов, так и элементов различного назначения на основе трехмерных структур. Среди многообразия используемых базовых материалов особое место занимают фотополимерные материалы, что связано с их относительно низкой стоимостью, возможностью изменения свойств путем введения различных компонент, а также простотой процессов получения элементов, исключающих предварительную и постэкспозиционную химическую или термическую обработку.

Можно выделить два основных направления, широко рассматриваемых в литературе: формирование рельефных структур и объемных структур с модуляцией показателя преломления, при этом, наибольшее внимание уделяется изучению процессов формирования структур в результате диффузионного массопереноса [1–2]. В то же время, существует ряд процессов, которым практически не уделяется внимания, и которые рассматривались ранее, скорее, как негативные. К таким процессам можно отнести процесс кислородного ингибирования радикальной полимеризации, светорассеяние, а также формирование поверхностного рельефа на поверхности объемной решетки. В данной работе эти процессы рассмотрены более детально и показана возможность их использования для улучшения характеристик структур и изменения свойств элементов на их основе.



а)



б)

Рис. 1. Зависимость кинетики роста поперечных размеров элементов периодической структуры от расстояния между элементами (а) и пример объемной субмикронной структуры с шириной элемента 1,5 мкм и отношением высота/ширина — 50

Исследованы особенности формирования объемных периодических структур в фотополимеризующихся композициях [3] с радикальной полимеризацией в субмикронном диапазоне размеров методом контактной литографии. На основании исследования зависимости поперечных размеров элементов от расстояния между элементами выявлена позитивная роль диффузионных процессов кислородного ингибирования, приводящих к

уменьшению размеров элементов относительно размеров наложенной световой области (рис. 1) и увеличению отношения высота/ширина.

Исследованы закономерности формирования объемных наноразмерных структур в интерференционном световом поле в фотополимеризующихся композициях, определяемые процессами диффузионного массопереноса. Установлена связь дифракционных свойств периодических структур с частотой записи, толщиной слоя, экспозиционными параметрами. Определены условия получения дифракционной эффективности до 80%. Показана возможность получения защитных элементов (рис. 2), а также светоделителей на основе пропускающей решетки и расщепителей световых пучков с регулируемым от 1:1 до 1:20 отношением интенсивностей.

а) б)

Рис. 2. Элементы на основе объемной пропускающей дифракционной решетки (а) и голограммы сфокусированного изображения (б), восстанавливаемые в белом свете

Рассмотрены возможные источники светорассеяния при формировании структур в глубоких полимерных слоях (с толщиной 100 и более мкм). Показана возможность получения светорассеивателей с узконаправленной индикатрисой на основе брэгговских структур — с углом по вертикали 4–6° и 0,5–1° по горизонтали. Такие светорассеиватели могут использоваться в оптических схемах устройств, в которых требование рационального использования выходной энергии лазеров является определяющим.

Исследованы особенности формирования и свойств гибридных объемно-поверхностных структур — пропускающих объемных решеток с поверхностным рельефом. Не смотря на большой объем исследований процессов формирования и свойств голографических решеток, свойства гибридных структур [4] практически не исследованы. В имеющихся работах [5] тонкая решетка на поверхности объемной решетки рассматривалась, как негативный фактор, приводящий к уменьшению дифракционной эффективности и увеличению светорассеяния. В данной работе показано, что формирование на поверхности объемной пропускающей решетки (с модуляцией показателя преломления) квазиобъемной решетки поверхностного рельефа, может приводить к существенному изменению селективных свойств без существенного изменения дифракционных свойств. Определены условия, при которых наблюдается значительное уширение контура угловой селективности гибридной структуры — до 35° относительно селективности объемной решетки — 2° при незначительном уменьшении дифракционной эффективности — в 1,5–2 раза (в зависимости от условий записи). Результаты могут быть полезны для получения защитных пропускающих голографических элементов в технологиях, базирующихся на визуальном контроле.

Источники

[1] Close C.E. Monomer diffusion rates in photopolymer material. Part II. High-frequency gratings and bulk diffusion / C.E. Close, M.R. Gleeson, D.A. Mooney, J.T. Sheridan // J. Opt. Soc. Am. B. — 2011. — Vol. 28. — No. 4. — P. 842–850.

[2] Смирнова Т.Н. Голографические нанокомпозиты для записи периодических структур полимер — наночастицы. II. Механизм образования объемной периодической структуры полимер — НЧ и влияние параметров формирующего поля на эффективность / Т.Н. Смирнова, Л.М. Кохтич, О.В. Сахно, И. Штумпе // Оптика и спектроскопия. — 2011. — Том 110. — №1. — С. 143–150.

[3] Burunkova Yu.E. Nanomodified optical acrylate composites / Yu.E. Burunkova, S.A. Semjina, L.N. Kaporsky, V.V. Levichev // Optical Journal. — 2008. — Vol. 75. — №10. — P. 54–58.

[4] Lucchetta D.E. Hybrid surface-relief/volume one dimensional holographic gratings / D.E. Lucchetta, P. Spegni, A. Di Donato, F. Simoni, R. Castagna // Optical Materials. — 2015. — Vol. 42. — P. 366–369.

[5] 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 // J. Opt. Soc. Am. B. — 2011. — Vol. 28. — №4. — P. 658–666.

The formation and properties of volume and hybrid surfase-relief/volume structures and elements on the basis of their

N.D. Vorzobova, V.O. Veselov
Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

The features of the formation and properties of volume periodic structures and hybrid structures with the surface relief in the thick (100 μm or more) polymer layers are investigated. The possibilities of obtaining light beams forming elements and security elements on their basis are considered.

The relevance of the problem of volume optical materials structuring is related to the possibility of creating a new class of materials — metamaterials, and elements for different purposes on the basis of three-dimensional structures. Among the variety of basic materials used a special place takes the photopolymeric materials. This is due to their relatively low cost, the ability to change the properties by the introduction of the various components, as well as the simplicity of the elements fabrication processes, excluding pre- and post-exposure chemical or heat treatment.

There are two main directions, widely discussed in the literature: the formation of the relief structures and three-dimensional structures with a modulation of the refractive index. Most attention is paid to the study of the processes of structures formation as a result of diffusion mass transfer [1–2]. At the same time, there are several processes that almost no attention and previously discussed rather as negative. These processes include the process of oxygen inhibition of radical polymerization, light scattering and the formation of a surface relief grating on the surface of the volume grating. In this paper these processes are discussed in greater detail, and the possibility of their using to improve he characteristics of structures and changes in the properties of elements based on them is shown.

The features of periodic structures formation in bulk photopolymerizable compositions [3] with radical polymerization in the submicron size range by contact lithography method were investigated. On the basis of studies dependence of the transverse dimensions of the elements on the distance between the elements, positive role of diffusion processes of oxygen inhibition was

found, leading to a reduction in the size of the elements relative to the size of the superimposed light area and an increase in the height/width ratio.

The regularities of three-dimensional structures formation in the interference light field in photopolymerizable compositions, determined by processes of diffusion mass transfer were investigated. The relationship of the diffraction properties of periodic structures with a frequency of recording, layer thickness, exposure parameters were found. The conditions for obtaining the diffraction efficiency of up to 80% were determined. The possibility of the security elements obtaining, and of light beam splitters on the basis of volume transmission grating and beams splitters with variable intensities ratio from 1:1 to 1:20 was shown.

The possible sources of light scattering by polymer structures formation in deep layers (with a thickness of 100 μm or more) were considered. The possibility of obtaining diffusers with highly directional scattering indicatrix on the basis of Bragg structures — with the angle in vertical direction of 4–6° and in horizontal direction of 0.5–1° was shown. These diffusers can be used in optical systems of the devices in which the requirement of rational using of the laser output power is decisive.

The features of the formation and properties of hybrid surface relief/volume structures — transmission volume gratings with surface relief gratings are investigated. Despite the large amount of research into the processes of formation and properties of holographic gratings, properties of hybrid structures are virtually unexplored [4]. In the existing works [5] thin grating on the surface of the bulk lattice was considered as a negative factor leading to a decrease in diffraction efficiency and an increase in light scattering. This paper shows that the formation on the surface of the volume transmission grating (with the refractive index modulation) of the quasi volume surface relief grating can lead to a significant change in the selective properties without significantly changing of the diffraction properties. The conditions under which there is a significant widening of the contour of the angular selectivity of the hybrid structure — up to 35° with respect to the volume grating selectivity — 2° with a insignificant decreasing in diffraction efficiency — 1.5–2 times (depending on the recording conditions) were determined. The results can be useful for security transmission holographic elements fabrication to techniques based on visual inspection.

References

[1] Close C.E. Monomer diffusion rates in photopolymer material. Part II. High-frequency gratings and bulk diffusion / C.E. Close, M.R. Gleeson, D.A. Mooney, J.T. Sheridan // J. Opt. Soc. Am. B. — 2011. — Vol. 28. — №4. — P. 842–850.

[2] Smirnova T.N. Holographic nanocomposites for recording of periodic structures polymer — nanoparticles. II. The mechanism of formation of the volume periodic structure polymer — NP and influence on the efficiency of field parameters / T.N. Smirnova, L.M. Kohtich, O.V. Sakhno, I. Stump // Optics and Spectroscopy. — 2011. — Vol. 110. — №1. — P. 143–150.

[3] Burunkova Yu.E. Nanomodified optical acrylate composites / Yu.E. Burunkova, S.A. Semjina, L.N. Kaporsky, V.V. Levichev // Optical Journal. — 2008. — Vol. 75. — №10. — P. 54–58.

[4] Lucchetta D.E. Hybrid surface-relief/volume one dimensional holographic gratings / D.E. Lucchetta, P. Spegni, A. Di Donato, F. Simoni, R. Castagna // Optical Materials. — 2015. — Vol. 42. — P. 366–369.

[5] 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 // J. Opt. Soc. Am. B. — 2011. — Vol. 28. — №4. — P. 658–666.

C1.4 Получение тонкопленочных картинных анизотропных элементов на рельефно-структурированных поверхностях

В.М. Козенков[1], Б.Р. Шаталов[2]
[1] Долгопрудный, Россия
[2] АО «НПО «Криптен», Дубна, Россия

Настоящая работа относится к технике поляризационного оптического приборостроения, а именно к твердотельным тонкопленочным анизотропным слоям, сформированным на поверхностно-структурированной гибкой (например, полимерной) или жесткой (например, пластиковой, стеклянной или металлической) основе с наперед заданным картинным (мозаичным или непрерывным) пространственным распределением направления оптической оси дихроизма поглощения и (или) двулучепреломления (ДЛП) и величины фазового набега по поверхности, изготовленных на основе органических красителей или веществ, проявляющих жидко-кристаллические (ЖК) свойства в растворе определенных растворителей (лиотропные ЖК-ЛЖК) или в определенном температурном интервале (термотропные ЖК-ТЖК).

Они могут быть использованы в таких областях, как запись, хранение, обработка и отображения оптической информации, например, при изготовлении ЖК дисплеев. Особый интерес предлагаемые слои могут представлять для создания новых поляризационно-оптических средств защиты информации от подделок и фальсификации в виде одно- и многоцветных, а также латентных цветных изображений, видимых только в поляризованном свете.

Хорошо известно, что ЖК вещества могут быть использованы в технике поляризационного оптического приборостроения в основном только в упорядоченном ЖК или твердотельном состоянии с высоко пространственно — ориентированными анизотропными молекулами в слое. Такое ориентационное состояние в макроскопическом масштабе, как правило, достигается внешними анизотропными (электрическими, магнитными, электромагнитными, акустическими, механическими и другими) силами [1].

Из существующего уровня техники поляризационного приборостроения наиболее известным является оптический поляризатор из ЛЖК [2]. Он представляет собой дихроичный поляризующий слой, изготавливаемый путем первоначального нанесения истинного раствора ЛЖК красителя на подложку, которой предварительно придается поверхностно-структурированная анизотропия в виде статистически упорядоченных по направлению и размеру микроканавок. Эта анизотропия получается за счет однонаправленного механического натирания поверхности подложки с помощью различных материалов (кожа, бумага, ткань и т.д.). В процессе последующего частичного испарения растворителя раствор дихроичного материала проходит через стадию ориентированного нематического ЖК состояния, во время которого под влиянием анизотропии поверхности происходит ориентация молекул дихроичного материала в микроканавках. При испарении остаточного растворителя на поверхности подложки образуется тонкая молекулярно-ориентированная поляризующая пленка, состоящая из статистически параллельно расположенных и ориентированных в одном направлении молекул дихроичного вещества.

Недостатком данного технического решения ориентации ЛЖК методом механического натирания подложки является ограниченная функциональная возможность, поскольку в соответствие с предложенной конструкцией оптическая ось дихроизма поглощения поляризатора ориентирована только в одном направлении на всей поверхности поляризатора. Это сужает возможности его широкого использования в качестве анизотропного

(дихроичного) поляризационного прибора. Кроме того, исключается возможность использования при массовом производстве по «roll-to-roll» технологии [3].

Задачей, на решение которой направлена работа, является дальнейшее расширение функциональных возможностей поляризационных элементов и устройств на основе ЖК при упрощении технологии, уменьшении стоимости их производства и улучшении воспроизводимости характеристик самого оптически анизотропного слоя.

Данная задача решается за счет того, что в работе предлагается способ получения поляризационных твердотельных оптических элементов, содержащих в своем составе твердотельный тонкопленочный картинно-ориентированный оптически анизотропный слой и подложку. Он отличается тем, что картинно-ориентированный анизотропный слой выполнен из материала, проявляющего ЖК свойства. При этом направление оптической оси дихроичного поглощения и (или) двулучепреломления в этом твердотельном слое картинно (мозаично или непрерывно) модулировано по площади, занимаемой указанным анизотропным слоем по любому, определенному, наперед заданному закону.

Как между самим анизотропным слоем этого элемента, так и между анизотропным слоем и подложкой размещается промежуточный поверхностно-структурированный ориентирующий рельефонесущий слой, который может быть выполнен в виде пространственно модулированных по направлению в пределах ±180° дифракционных решеток или голограмм. Поверхность подложки, непосредственно контактирующей с анизотропным слоем, также может быть структурирована в виде рельефонесущих дифракционных решеток или голограмм.

Оригинальные рельефонесущие дифракционные решетки или голограммы могут быть получены по аналоговой (интерференционно-оптической) или цифровой (электронно-лучевой, дот- или фрейм-матрикс (dot-matrix) [4]) технологиям. При этом картинный (мозаично или непрерывно) рисунок таких структур модулирован по площади по определенному, наперед заданному заранее закону в виде пространственных картин заданных размеров и форм голограмм или дифракционных решеток, имеющих заданные регулярный период, глубину и ориентацию в пространстве в каждой из картин структурированной поверхности ориентирующего слоя.

Анизотропный слой может быть выполнен из монохромного вещества, проявляющего дихроизм поглощения в какой либо части УФ, видимой (например, красной, синей, зеленой) или ИК области спектра, во всей видимой (красной, синей, зеленой) области спектра, обеспечивающей серый (нейтральный) спектр поглощения, из бесцветного материала, поглощающего в УФ и проявляющего эффект ДЛП в видимой области спектра, или из бесцветного материала, проявляющего эффект анизотропной люминесценции или фосфоресценции в видимой или ИК области спектра под действием неполяризованного или поляризованного УФ излучения.

Локальное пространственное направление оптической оси дихроичного поглощения и(или) ДЛП в этом анизотропном слое поляризационного элемента по площади, занимаемой указанным анизотропным слоем, может быть картинно или непрерывно пространственно модулировано в пределах ±180°, совпадающим с локальным пространственным направлением голограмм или дифракционных решеток. Оно может непрерывно или прерывно изменяться изогнуто, или изменяться в дуговой, или иной форме, при этом дуга может быть частью эллипса, а также в виде концентрических окружностей, или радиальных лучей в каждой из картинок и т.д.

При этом дипольные моменты оптического перехода анизотропных молекул каждого тонкопленочного поляризационного слоя, в зависимости от их молекулярной структуры и свойств образовывать ЖК фазу, могут быть ориентированы вдоль или поперек направлений

ориентаций в пространстве дифракционных решеток или голограмм в поверхностно-структурированном ориентирующем слое или поверхностно структурированной подложке.

Для формирования тонкопленочных твердотельных слоев предложенного поляризационного элемента может быть использовано типовое оборудование для нанесения различных полимерных слоев, например, поливочные установки лакокрасочной промышленности и полиграфическое оборудование типа флексографической, сетко-трафаретной, высокой или глубокой печати и т.д.

В частности, с помощью различных способов многовалковой печати по методу «roll-to-roll» может быть организовано массовое производство латентных многоцветных поляризационных защитных элементов.

При этом поверхностно-структурированные свойства ориентирующих слоев и поверхности подложки могут быть сформированы, как и обычных голограмм, методом горячего или холодного тиснения в полимерных слоях, или «2Р» процессом фото- или электроно-отвердения слоев мономерных или олигомерных композиций и могут быть выполнены в виде пространственных картин заданных размеров и форм и имеющих заданные регулярный период и глубину и ориентацию в каждой из картин поляризационного элемента.

Поляризационный элемент может быть использован, например, в виде поляризационных линз, линейных и круговых поляризаторах и других оптических поляризационных элементах и устройствах.

Техническим результатом, обеспечиваемым приведенной совокупностью признаков, является применение по новому назначению технологий получения и массового тиражирования оптических элементов в виде рельефонесущих голограмм и дифракционных решеток, которые применяются в спектральном приборостроении, лазерах, метрологических мерах малой длины, средствах защиты от подделок от фальсификации изделий бытовой и промышленной техники и т.д. В указанных применениях пространственная решеточная структура используется для спектрального дифракционного отклонения и или интерференции падающего на них оптического излучения. В предлагаемой работе она используется для получения картинно-ориентированных поляризационных элементов (КОПЭ) с такими анизотропно-структурированными твердотельными анизотропными слоями с произвольным, наперед заданным картинным (мозаичным или непрерывным) пространственным распределением направления оптической оси дихроизма поглощения и (или) двулучепреломления (ДЛП) и величины фазового набега по поверхности, которые могут найти широкое применение.

Для этого на гибкую (например, полимерную) или жесткую (например, пластиковую, стеклянную или металлическую) основу (подложку) нанесен тонкий (толщиной от одного до нескольких мкм) поверхностно-структурированный полимерный слой с наперед заданным картинным (мозаичным или непрерывным) пространственным распределением направлений микрорельефа, на котором, в свою очередь, сформирован твердотельный тонкопленочный анизотропный слой, толщиной в пределах 0,1–1 мкм, изготовленный на основе органических красителей или веществ, проявляющих лиотропную или термотропную ЖК фазу. Пространственное распределение направления оптической оси дихроизма поглощения и(или) ДЛП и величины фазового набега по поверхности данного слоя картинно (мозаично или непрерывно) повторяет поверхностно-структурированную картину микрорельефа полимерного слоя.

В качестве примера в работе исходная картинная дифракционная решетка получалась путем экспонирования слоя позитивного фоторезиста для голографии (от НИОПиК) на стеклянной подложке УФ лазером по аналоговой (оптически-интерференционной) технологии и последующего его проявления в щелочном проявителе. В результате была получена

дифракционная решетка с картинной рельефно — структурированной поверхностью с пространственным периодом около 0,3 мкм и глубиной рельефа около 0,2 мкм. Форма и размеры каждой из картинок изменялась в пределах от нескольких мм до десятка мм. Направления штрихов в каждой из них было заданными и изменялись на 15, 30, 45, 60, 75 и 90° друг относительно друга.

Далее, по технологии производства радужных голограмм, с этой картинной рельефонесущей решетки снималась гальваническая копия, после чего ее рекомбинировали (мультиплицировали) путем многократного тиснения на поверхности пластика, с последующим получением никелевой *рабочей матрицы* с множеством дифракционных решеток с картинно структурированными поверхностями.

Для массового производства КОПЭ *рабочая матрица* размещалась на вал установки для тиснения радужных голограмм и производилось тиснение ориентирующих слоев с указанными картинно-структурированными ориентирующими поверхностями. В качестве подложки использовался рулон ПЭТ пленки толщиной 20 мкм и шириной 120 мм с восковым разделительным слоем и термопластическим лаковым слоем для тиснения. Для увеличения смачиваемости ЖК растворов относительно поверхности ориентирующих слоев на них термическим испарением в вакууме был нанесен тонкий адгезионный слой.

После этого на поливочной установке на них наносился изотропный раствор ЛЖК анизотропных веществ (от Corning, USA) с жестко контролируемыми изначальной концентрацией сухого остатка, температурой нагрева и скорости нанесения слоя.

В результате после сушки были получены КОПЭ в виде мозаичных серых поляризаторов с оптическими осями, ориентированными под углами 15, 30, 45, 60, 75 или 90° друг относительно друга в каждом из мозаик.

Поверхностно-структурированные свойства ориентирующих слоев и поверхности подложки могут быть сформированы, как и обычные радужные голограммы, методом горячего или холодного тиснения в полимерных слоях, или «2Р» процессом фото- или электроно-отвердения слоев мономерных или олигомерных композиций и могут быть выполнены в виде пространственных картин заданных размеров и форм и имеющих заданные регулярный период и глубину и ориентацию в каждой из картин поляризационного элемента.

Известно, что многие из лиотропных веществ проявляют высокую термо- и фотостойкость к выцветанию в твердотельном ориентированном состоянии [5]. В связи с этим они могут быть использованы в качестве поляризационных фотомасок, выполненных в виде КОПЭ.

В работе была осуществлена возможность массового производства многоцветного латентного защитного элемента на термотропном фотоотверждаемом ЖК материале по «roll-to-roll» технологии методом непрерывной контактной фотопечати с использованием картинных поляризационных фотомасок, изготовленных в виде КОПЭ из ЛЖК материала фирмы Corning (USA).

В этой схеме используется метод фотоориентации термотропных ЖК (ТЖК) [6] для получения картинно ориентированных КОПЭ.

В качестве фотоориентанта был использован мономолекулярный слой фотохимически стабильного водорастворимого азокрасителя протравного чисто—желтого (ПЧЖ или SD1 в зарубежной технической литературе [7]), фотоотверждаемым ЖК являлся ТЖК фирмы Merck. Экспонирование фотоориентанта осуществлялось светодиодным блоком УФ излучения 008 (ООО «ПК САН», Россия) с длиной волны излучения 385 нм, а отверждение ТЖК — УФ излучением трубчатой лампы.

При формировании многоцветных латентных защитных элементов, множество поляризационных масок в виде анизотропных КОПЭ, размещенных на единой полимерной

пленке, контактируют непосредственно со слоем ПЧЖ и синхронно перемещаются по замкнутому контуру в виде бесконечной ленты, облучаются неполяризованным светом, проходящим через картинный поляризатор. При этом в слое ПЧЖ фотоиндуцированно формируется анизотропно ориентированная картина молекул ПЧЖ, которая, в свою очередь, картинно ориентирует слой ТЖК. Далее этот слой отверждается дополнительным УФ с образованием многоцветных латентных защитных элементов.

Источники

[1] Ullmann`s Encyclopadie der tech. Chemie / 4th Ed. — VerlagChemie, 1976. — Vol. 11. —P. 658–671. Seddon J. M. Handbook of liquid crystals. — Wiley-VCH, Weinheim, 1998.
[2] Patent №2,400,877 A US. — Опубл. 28.05.1946.
Dreyer J.F. Light polarization from films of lyotropic nematic liquid crystals // Journ. de Physique Colloques. — 1969. — 30 (C4). — P. 114–116.
[3] Watts M.P.C. Advances in roll to roll processing of optics // SPIE Proc. — 2008. — Vol. 6883. — P. 688305.
[4] Патент №5,262,879 US. — Опубл. 16.11.1993.
Патент №5,822,092 US. — Опубл. 13.10.1998.
Van Renesse R.L. Securuty aspects commercially available dot matrix and image matrix origination systems // SPIE International Conference on Optical Holography and its Applications, 24–27 May 2004, Kiev, Ukraine.
[5] Патент №1,642,741 RU. — Опубл. 20.04.1996.
Патент №6,174,394 B1 US. — Опубл. 16.01.2001.
[6] Chigrinov V.G. Photoalignment of Liquid Crystalline Materials / V.G. Chigrinov, V.M. Kozenkov, H.S. Kwok // Physics and Applications. — Wiley, 2008. — 248 p.
[7] Chigrinov V. Synthesis and properties of azo dye aligning layers for liquid crystal cells / V. Chigrinov, E. Prudnikova, V. Kozenkov, H. Kwok, H. Akiyama, T. Kawara, H. Takada, H. Takatsu // Liq. Cryst. — 2002. — 29. — P. 1321–1327.

Production of thin-film art anisotropic elements in the relief-structured surfaces

V.M. Kozenkov[1], B.R. Shatalov[2]
[1] Dolgoprudny, Russia
[2] JSC “RPC “Krypten”, Dubna, Russia

This work refers to the technique of polarization optical instrument, namely a solid state thin film anisotropic layers formed on the surface-structured flexible or rigid substrate to a given picture of the spatial distribution of the direction of the optical axis of the absorption dichroism and (or) birefringence (birefringence) and the magnitude of the phase shift on surface made based on organic dyes or substances which exhibit liquid-crystal (LCD), certain properties of the solvent solution (lyotropic LC-LZHK) or in a certain temperature range (LCD thermotropic TFAs).

C1.5 Коноскопическая голография в «белом» свете на фотоанизотропных средах

В.М. Козенков[1], А.А. Спахов[2]
[1] Долгопрудный, Россия
[2] Московский государственный областной университет, Москва, Россия

Conoscopic holography in “white” light on the photoanisotropic media

V.M. Kozenkov[1], A.A. Spakhov[2]
[1] Dolgoprudii, Russia
[2] Moscow Region State University, Moscow, Russia

Conoscopy holography is an incoherent (monochromatic) light Fresnel holographic technique proposed in 1985 [1–3] with the aim of building a three-dimensional (3D) camera, i.e., a camera that records both the image and the shape of objects. The use of spatially incoherent light makes it possible to use this technique in various environments, and its resolution is compatible with CCD sensors, which permits the interface with a computer for the digital processing of the holograms.

The basic system, called a conoscope because it produced the well-known conoscope figures, is show in figure. A uniaxial crystal (C) is sandwiched between two circular polarizers (P1 and P2).

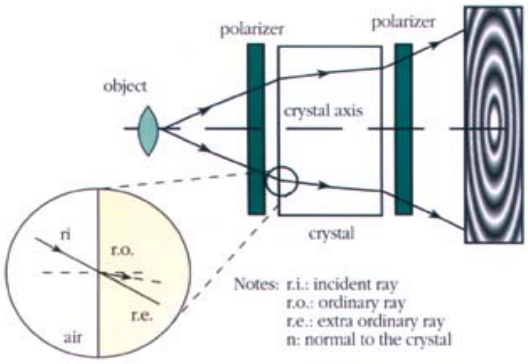


Fig. 1

In the on-axis configuration the crystal axis is parallel to the geometrical axis, *OZ*, of the system.

As with other similar technique, each object point S produces, on the recording plane, a Gabor zone pattern that encodes both its lateral and longitudinal positions. This pattern results from the interference of two longitudinally displaced points that are the ordinary and extraordinary images of the original point source through the birefringent crystal.

In the classical scheme shown in the figure, the role of the first polarizer is intended for the formation of two optical flows, carriers such as information on the detected object and the reference beam, providing an interference pattern. As a result, the imaging plane in figure emerging recording element arrangement plane (photosensitive material layer for long-term storage or electronic type camera system CCDs for further electronic processing of the information received

in real time). However, as the recording medium, so the photosensitive electronic structure in the form of, for example, CD camera is not sensitive to the polarization properties of the objects.

This report presents the results of experimental studies on the so-called photoanisotropic materials for capacity building of conoscopic holography schemes.

References

[1] Serat G. Conoscopic holography / G. Serat, D. Psaltis // Opt. Lett. — 1985. — 10. — P. 4–6.
[2] Serat G. Conoscopic holograms / G. Serat, D. Psaltis // Opt. Commun. — 1988. — 65. — P. 243–249.
[3] Patent №5,953,137 A US. Linear conoscopic holograpy. G.Y. Sirat, J. Vecht, Y. Malet. — 1999.

C1.6 Композиции УФ-отверждения для голографии

А.В. Жданова[1, 2], О.Э. Бабкин[1], В.Н. Михайлов[1, 2]
[1] Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, Санкт-Петербург, Россия
[2] ООО «ХолоГрэйт», Санкт-Петербург, Россия

Приводится обзор исследований фотополимеризующихся композиций (ФПК) применяемых в голографии.

Материалы, рассматриваемые в данной работе, представляют собой полимеры синтезированные путем фотополимеризации, т.е. путем цепных реакций, которые индуцируются с помощью света. Фотополимеризация может протекать как по радикальному так и по ионному механизму. В данной работе рассматриваются материалы синтезированные по радикальному механизму фотополимеризации.

ФПК представляет собой многокомпонентную смесь, включающую олигомеры и мономеры различной химической природы, фотоинициаторы (ФИ), а также всевозможные функциональные добавки (пеногасители, растекатели и т.д.).

В технологии УФ-отверждения используются непредельные олигоэфиры, а именно акриловые и метакриловые олигомеры. (мет.) Акриловыми называют линейные или разветвленные олигомеры, содержащие на концах молекул и (или) в боковых ответвлениях одну, две или более метакриловых или акриловых групп. [1, 2]

Реактивные мономеры вводятся в жидкую композицию в первую очередь для регулирования ее вязкости. В отличие от стандартных органических растворителей реактивные мономеры принимают участие в построении полимера, поэтому они также носят название активных разбавителей. Реактивные мономеры классифицируются по функциональности (т.е. по количеству –C=C-связей в молекуле) на моно-, ди-, три- и тетрафункциональные.

В настоящее время распространено использование в качестве ФПК для голографии ОКМ-2, разработанную советскими учеными [2].

Влияние мономерного состава на свойства ФПК УФ-отверждения рассмотрено авторами в работе [3]. Показано, что наличие полярных и неполярных групп в молекуле мономера оказывает влияние на гидрофильно-липофильный баланс композиции и отвержденного материала.

Варьируя состав композиции можно получать материалы для различных применений, например, ФПК для снятия реплик с дифракционных решеток [4], клей УФ-отверждения для холодного тиснения фольгой [5], ФПК для оперативного формирования 3D-объектов с помощью голографических изображений [6].

Источники

[1] Сусоров И.А. Анализ закономерностей синтеза олигомерных и высокомолекулярных соединений методом цепной полимеризации / И.А. Сусоров, О.Э. Бабкин. — СПб: СПбГИКиТ, 2015. — 238 с.
[2] Берлин А.А. Акриловые олигомеры и материалы на их основе / А.А. Берлин, Г.В. Королев, Т.Я. Кефели, Ю.М. Сивергин. — М.: Химия, 1983. — 232 с.
[3] Бабкин, О.Э. Влияние соотношения полярных и неполярных групп в мономерах на свойства УФ-отверждаемого защитного покрытия / О.Э. Бабкин, А.В. Жданова // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2016. — №5 — С. 46–48.
[4] Бабкин О.Э. УФ-отверждаемый полимерный материал для создания реплик дифракционных оптических элементов / О.Э. Бабкин, А.В. Жданова, В.В. Ильина, В.Н. Михайлов // Мир Техники кино. — 2014. — №3 (33). — С. 32–36.

[5] Бабкин О.Э. Влияние олигомеров и мономеров на свойства клея УФ-отверждения для холодного тиснения фольгой / О.Э. Бабкин, А.В. Жданова // Клеи. Герметики. Технологии. — 2016. — №1. — С. 2–8.
[6] Бабкин О.Э. Использование голографических изображений при оперативном формировании 3D-объектов методом фотополимеризации / О.Э. Бабкин, В.В. Ильина, И.Г. Чезлов, В.Н. Михайлов // Мир техники кино. — 2013. — №1 (27). — С. 30–33.

The compositions of UV curing for holography

A.V. Zhdanova[1, 2], O.E. Babkin[1], V.N. Mikhailov[1, 2]
[1] Saint Petersburg State University of Film and Television, Saint Petersburg, Russia
[2] Ltd. «HoloGrate», Saint Petersburg, Russia

A review of research photopolymerizable compositions (FPC) that are used in holography.

The materials that are considered in this research are polymers synthesized by photopolymerization by chain reactions that are induced by light. Photopolymerization can proceed both by the radical or ionic mechanism. This research discusses the materials that are synthesized by a radical mechanism of photopolymerization.

FPC is a multicomponent mixture comprising monomers and oligomers of different chemical nature, photoinitiators (PI), and the various functional additives.

The technology uses a UV-curing unsaturated oligoesters, namely acrylic and methacrylic oligomers. (Meth) acrylic referred to as linear or branched oligomers containing at molecule ends and (or) side branches one, two or more acrylic or methacrylic groups.

Reactive monomers are introduced into the liquid composition primarily to regulate its viscosity. In contrast to standard organic solvents, reactive monomers participating in the construction of the polymer, so they are also called reactive diluents. Reactive monomers are classified in terms of functionality (i.e., number of C=C bonds in the molecule) on the mono-, di-, tri- and tetrafunctional.

Currently, «ОКМ-2» that was developed by Soviet scientists is commonly used as an FPC for holography.

Influence of monomer composition on the properties of FPC UV-curing is considered by the authors in [3]. It is shown that the presence of polar and nonpolar groups in the monomer molecule affects the HLB of the composition and the cured material.

By varying the composition it is possible to obtain materials for various applications, for example, FPC to remove replicas from the diffraction grating [4], the UV-curing adhesive for cold foil [5], FPC for rapid formation of 3D-objects using holographic images [6].

С1.7 Получение защитных голограмм с визуализацией звукового поля

М.С. Ковалев, К.Г. Красин, С.Б. Одиноков, Н.Г. Сцепуро
Московский государственынй технчиеский университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Несмотря на разную природу звука и света, распространение звуковых и электромагнитных волн подчиняются одними и тем же физическими законами и описываются одними и теми же уравнениями. Визуализация звукового поля (ВЗП) – это метод получения видимой картины распределения величин, характеризующих звуковое поле. На основе этого разработан алгоритм расчета и получения бинарного дифракционного оптического элемента (ДОЭ), который восстанавливает набор дискретных сигналов с заданными параметрами для воспроизведения звуковой информации. На основе чего и будет синтезироваться защитный элемент.

Для расчета данных ДОЭ используется метод квантования непрерывного рельефа (КНР) дифракционной зоны на амплитудные уровни. Полученные данные с такого дифракционного элемента представляются полутоновым растром, где каждая точка соответствует определенной величине амплитуды сигнала. Для уменьшения объема данных при расчете ДОЭ с непрерывным профилем предлагается использовать векторно-градиентный формат данных. При этом вектор включает в себя начальный амплитудный уровень, градиент амплитуды и длину вектора. Следовательно, непрерывная кривая профиля амплитуды ДОЭ будет аппроксимироваться последовательностью векторов.

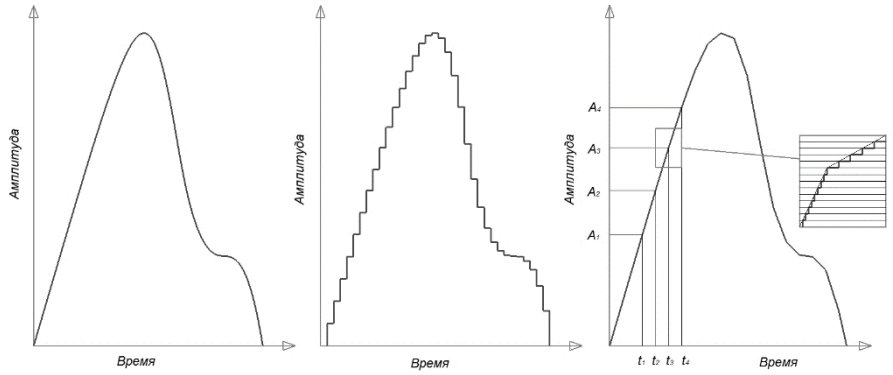


Рис. 1. Непрерывный кривая профиля амплитуды (а) ДОЭ методом КНР (б) и кусочно-линейным методом (в)

На рис. 1а показан метод аппроксимации непрерывного амплитудного профиля. На рис. 1б показана векторная аппроксимация при помощи метода КНР, а на рис. 1в показан метод использования вектора с градиентом, где каждый сегмент задается одним вектором. Точное описание кривой достигается за счет увеличения количества векторов. Если сравнивать аппроксимацию методом КНР и аппроксимацию вектором с градиентом, то во втором случае исходных данных значительно меньше, что упрощает задачу расчета микроструктуры ДОЭ, а также получение данного ДОЭ.

ВЗП на основе ДОЭ — метод, который основывается на бесконтактном считывании дифракционной структуры в полутоновом растре. Данный метод ВЗП обладает рядом преимуществ, а именно: время считывания защитного элемента составляет всего 10^{-5}–10^{-6} с; частота закодированного сигнала никак не ограничена, что позволяет нам синтезировать любой звуковой сигнал.

Источники

[1] Грегуш П. Звуковидение: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 232 с.
[2] Полещук А.Г. Изготовление рельефно-фазовых структур с непрерывным и многоуровневым профилем для дифракционной оптики // Автометрия. — 1992. — №1.
[3] Шиманский Р. В. Оптические метода прямой записи при изготовлении ДОЭ с непрерывным профилем / Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В., Харисов А. А. // Компьютерная оптика. — 2000. — №20 — С. 80–84.
[4] Энциклопедия физики и техники. Визуализация звуковых полей / URL: http://femto.com.ua/articles/part_1/0488.html (дата обращения 25.06.2016).

Receiving security holograms with visualization of sound field

M.S. Kovalev, G.K. Krasin, S.B. Odinokov, N.G. Stsepuro
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Despite the different nature of sound and light, the propagation of sound and electromagnetic waves are subject to the same physical laws and are described by the same equations. Visualization of the sound field (VSF) — a method of producing a visible picture of the distribution of values that characterize the sound field. Based on this algorithm has been developed for calculating and obtaining the binary diffractive optical element (DOE), which reconstructs a set of digital signals with specified parameters for reproducing the audio information. Based on this will be synthesized and protective element.

Стендовые доклады
Секция №2

Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики

Poster presentations
Section №2

C2.1 Исследование пространственно-энергетических характеристик фокальных областей бифокальных дифракционно-рефракционных хрусталиков глаза

Г.А. Ленкова
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Основным контролируемым параметром искусственных хрусталиков глаза (интраокулярных линз ИОЛ) является рефракция (оптическая сила). В случае дифракционно-рефракционных ИОЛ существенное значение имеет также распределение интенсивности света (дифракционная эффективность) по порядкам дифракции, которые формируют изображения ближних и дальних объектов на сетчатке глаза. Дифракционная эффективность зависит от формы (высоты и топологии) структуры дифракционного компонента. В дифракционно-рефракционном хрусталике МИОЛ-Аккорд [1], разработанном в институте автоматики и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск), на неё влияют также особенности дифракционного компонента, заключающиеся в уменьшении центральной зоны и компенсации сферических аберраций глаза (роговицы, стекловидного тела и рефракционного компонента).

Цель работы — компьютерное моделирование процесса измерения параметров распределения интенсивности (фокусных расстояний и дифракционной эффективности) в фокальных областях дифракционно-рефракционных бифокальных хрусталиков.

Моделирование осуществлялось на основе метода с лазерным источником света [2], в котором дифракционно-рефракционная ИОЛ освещается параллельным или сходящимся (с учётом влияния роговицы глаза) пучком света. Расчёты осуществлялись по специальной программе, разработанной П.С. Завьяловым.

На рис. 1 представлена оптическая схема, используемая в программе. Предполагалось, что на дифракционный компонент, сформированный на плоской поверхности дифракционно-рефракционной ИОЛ (1 на рисунке) падает сферическая волна с фокусом f с наложенными аберрациями в виде OPD — оптической разности хода лучей, определённой в среде Zemax. Форма дифракционного компонента ИОЛ соответствует характеристическому уравнению [1]:

$$(k + a_0)\lambda = a_1 r^2 - a_2 r^4, \qquad (1)$$

где $k = 0, 1, 2...$ и r — номер и радиус зоны структуры; λ — длина волны в вакууме; a_0 — коэффициент, характеризующий фазовый сдвиг в длинах волн и уменьшение радиуса центральной зоны; $a_1 = n / 2f$ — коэффициент, определяющий номинальную оптическую силу дифракционного элемента, a_2 — аберрационный коэффициент.

Исследования проводились для дифракционно-рефракционного хрусталика МИОЛ-Аккорд, в котором $a_0 = 0{,}24$, $a_1 = 0{,}002097$ мм$^{-1}$ (что соответствует оптической силе дифракционного компонента 4,2 дптр) и $a_2 = 0{,}0000543$ мм$^{-3}$, $\lambda = 0{,}5461$ мкм, $n = 1{,}336$ и $n_{\mathrm{IOL}} = 1{,}505$ — показатели преломления окружающей среды и материала, из которого сделана линза. Максимальна высота дифракционной структуры $h = 1{,}62$ мкм соответствует фазовой задержке, равной $\lambda/2$, при которой одинаковое количество света по 40,5% направляется в 0-й (дальнее зрение) и + 1-й (ближнее зрение) порядки дифракции.

Предварительно по известным формулам рассчитывались относительное распределение интенсивности $I(x) = (\sin x / x)^2$ вдоль оси и $I(x) = [2J_1(x) / x]^2$ поперёк оси, а также концентрация энергии в фокальном пятне $E(x) = 1 - J_0^2(x) - J_1^2(x)$.

В программе это соответствовало нулевым значениям коэффициентов a_0 и a_2 в формуле (1). Кроме того полагалось, что $h = 0$, т.е. был один 0-й порядок дифракции.

Получено, что расстояние от фокуса до точки наблюдения z, определённое по программе, отклоняется от теоретических значений в сторону уменьшения на 2–48 мкм (≈5%). Интенсивности в фокусах меньше на 0,1% по абсолютной величине. Значения радиусов колец в фокальной плоскости, практически совпадают (отклонение <0,5 мкм). Отклонения интенсивности в кольцах функции рассеяния лежат в пределах 0,05–0,37%. Отклонение энергии внутри колец в фокальной плоскости не превышает 1–2%. Небольшие расхождения расчётов по формулам и по программе можно объяснить дискретностями задания параметров ($dr = 1$ мкм, $dz = 5$ мкм, $dx = 0{,}5$ мкм).

Далее по программе рассчитывались распределения световой энергии при $h = 0{,}5\lambda$ (0-й и +1-й порядки дифракции в среде и +1-й и +2-й — в воздухе) при разных значениях коэффициентов a_0 и a_2. Результаты приведены ниже в таблице.

Отмечено, что характер распределения интенсивности зависит от взаимного влияния порядков дифракции. Например, при увеличении значения a_1 в два раза, т.е. при смещении +1-го фокуса ближе к линзе, расхождение значения дифракционной эффективности с теорией уменьшается приблизительно также в два раза.

В первом приближении (геометрическом) взаимное влияние порядков можно оценить в виде соотношения площадей s_ρ/s_γ внутри тёмных колец с радиусом ρ в фокальной плоскости рассматриваемого порядка и площади засветки от расходящегося пучка другого порядка с радиусом γ (показано в правой части рисунка). Оказалось, что оотношение s_ρ/s_γ, имеет одинаковое выражение для фокальных плоскостей обоих порядков: $s_\rho/s_\gamma = \chi^2(\lambda/n)^2[f_0 f_{+1}/(a^2\Delta f)]^2$, $\chi = a\rho n/\lambda f$. Однако энергии в двух порядках будут равны, если высота структуры выполнена правильно. В противном случае влияние будет разным и будет соответствовать отношению теоретических значений дифракционных эффективностей в этих порядках, но в любом случае абсолютное значение энергия будет больше теоретического значения.

В таблице приведены значения фокусных расстояний f, интенсивностей вдоль оси I_{max} и значений энергии внутри диска Эйри (первого кольца) и 6-ти колец в зависимости от значений a_0 и a_2. Во 2-й строке 7–10 столбцов таблицы в скобках даны значения энергий $E_0 = E_{+1} = 0{,}405\,E(x)$, где $E(x)$ вычислено при $h = 0$ в среде.

Отмечено, что распределение интенсивности вдоль оси, определяемое по программе, зависит от выбранной дискретности параметров, от значений фокусных расстояний и не характеризует полную энергию (эффективность). Фактически интенсивность на оси — это интенсивность в центре освещаемого поля и в фокусах она обратно пропорциональна квадрату отношения фокусных расстояний, что соответствует изменению масштаба распределения интенсивности в фокальных плоскостях (в поперечном сечении). Действительно для идеальной структуры (при $h = 0{,}5\lambda$, $a_0 = 0$, $a_2 = 0$) в условиях среды (3 строка таблицы) отношение интенсивностей в порядках (в 5-м и 6-м столбцах), равное 1,12 совпадает с обратным отношением квадратов фокусных расстояний (в 3-м и 4-м столбцах). А дифракционная эффективность — это полная (интегральная) интенсивность в поперечном сечении пучка в фокусе. Из таблицы видно, что при $a_0 = 0$, $a_2 = 0$ (3 строка, 7–10 столбцы) энергии внутри колец практически равны между собой, а для дисков Эйри почти совпадают со значением, указанным в скобках. Энергии внутри 6-ти колец приблизительно на 2% больше, чем значение в скобках, так как уже становится заметным взаимное влияние порядков. При разных комбинациях значений a_0 и a_2 фокусные расстояния f изменяются не более чем на 0,1 мм (соответствует ≈0,5 дптр). Интенсивности I_{max} в 0-м и +1-м порядках изменяются в пределах

3,2 и 4.4 % причём в сторону уменьшения, энергии внутри колец уменьшаются на 2–4%. Равенство энергий для 0-го и +1-го порядков наблюдается также при сочетании $a_0 = 0{,}24$ и $a_2 = 0$, хотя значение энергий для диска Эйри меньше, а для 6-ти колец больше приблизительно на 1,5%. В последнем случае (8 строка) значение энергии в +1-м порядке больше чем в 0-м для диска Эйри на 3,2%, а для 6-ти колец на 1,5%. При разных комбинациях значений a_0 и a_2 радиусы колец в фокальной плоскости практически не изменяются.

Табл. 1

a_0	a_2	f, мм		I_{max}, %		Энергия внутри 1-го кольца (в диске Эйри), %		Энергия внутри 6-ти колец, %	
		0	+1	0	+1	0 (35,0)	+1 (35,0)	0 (41,2)	+1 (41,2)
0	0	20,00	18,82	41,3	46,4	35,6	35,5	43,8	43,5
0*	0	19,93	18,76	41,6	42,0	35,9	31,2	44,9	42,1
0	≠0	19,99	18,89	40,0	43,7	35,1	34,9	43,3	44,1
0,24	0	20,00	18,81	39,0	44,1	33,4	33,5	42,7	42,8
0,24	≠0	20,00	18,88	40,5	42,3	34,0	32,1	43,3	41,8
0,24*	≠0	19,93	18,82	38,1	45,7	31,0	34,2	41,8	43,3

Моделирование процесса контроля характеристик ИОЛ показало, что из-за взаимного влияния порядков дифракции невозможно измерить абсолютную дифракционную эффективность. В зависимости от диаметра диафрагмы фотоприёмного устройства к абсолютной энергии одного порядка всегда добавляется некоторая часть (а при большой диафрагме полностью) энергии другого порядка. Поэтому можно измерить только относительную при измерениях имеет смысл оценивать эффективность. Абсолютное измерение возможно локально, при освещении малой поверхности узким пучком. В этом случае порядки пространственно разделяются и воспринимаются отдельно. Или можно измерять фон и вычитать из показаний фотоприёмника.

Источники

[1] Ленкова Г.А. Дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы / Г.А. Ленкова, В.П. Корольков, В.П. Коронкевич, Р.К. Насыров, А.С. Гутман, И.А. Искаков, В.М. Треушников // Автометрия. — 2008. — Том 44. — №4. — С. 75–88.

[2] Ленкова Г.А. Особенности измерения оптической силы искусственных рефракционных и дифракционно-рефракционных хрусталиков глаза // Оптика и спектроскопия. — 2016.

Research of spatial-power characteristics of focal areas of bifocal diffractive-refractive crystalline lenses of a eye

G.A. Lenkova
Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The main controlled parameter of artificial crystalline lenses of an eye (intraocular lenses IOL) is the refraction (optical power). In case of diffractive-refractive IOL essential value has also distribution of intensity of light (diffraction efficiency) on diffraction orders which form images of near and far objects on an eye retina.

Computer modeling of process of measurement of parameters of diffractive-refractive bifocal crystalline lenses like MIOL-Akkord [1], developed at Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the RAS (Novosibirsk) is carried out. In the diffraction element of MIOL-Akkord the central zone is reduced and compensation of spherical aberrations of an eye is provided. Previously for verification of the program intensity distribution calculations (along and across an optical axis) and concentration of energy in rings of dispersion function on the known formulas for an ideal diffraction lens are carried out. Comparison with calculation under the program showed rather good coincidence

Modeling of process of control of characteristics of IOL is shown that distribution of intensity along an axis depends on the chosen discretization of parameters and distances between focuses. The ratio of intensity in diffraction orders in inverse proportion to a square of the relation of focal lengths also doesn't characterize a total energy (efficiency). Diffraction efficiency is a full (integrated) intensity in the cross section of a bunch in focus. Because of mutual influence of orders of diffraction it is impossible to measure absolute diffraction efficiency. Depending on diameter of a diaphragm of a photodetector energy of other order partially or completely is always added to absolute energy of one order. Therefore it makes sense to estimate only relative efficiency.

References

[1] Lenkova G.A., Korolkov V.P., Koronkevich V.P., et al. // Optoelectr Instrum. and Data Process. — 2008. — 44 (4). — P. 342–352.

C2.2 Определение характеристик капли методами цифровой голографии

А.С. Ольшуков, В.В. Демин
Томский государственный университет, Томск, Россия

Обозначены основные задачи при исследовании голографическими методами микрочастиц, расположенных в объёме среды. Рассмотрен пример обработки голограмм планктонных частиц и извлечения информации. Показаны перспективы развития алгоритмов обработки цифровых голограмм частиц.

Defining characteristics of the drops by digital holography

A.S. Olshukov, V.V. Demin
Tomsk State University, Tomsk, Russia

The main challenges of investigation of particles located in the volume of a medium with the use the holographic methods are designated. An example of plankton particles holograms processing and the information extraction is considered. The prospects of the particles digital holograms processing algorithms are discussed.

C2.3 Использование алгоритма адаптивной оптимизации для получения заданных амплитудно-фазовых характеристик волнового фронта

Т.А. Вовк, Н.В. Петров
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Синтез дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является важной задачей в экспериментальной оптике. Методы синтеза светового поля с помощью ДОЭ обеспечивают решение задач, где требуется сложная конфигурация оптического поля, например, изменение формы лазерного пучка [1], цифровая голография [2], формирование и передача оптической информации [3], манипулирование объектами микромира и биологическими клетками [4].

Основной функцией ДОЭ можно назвать синтез требуемого распределения светового поля в заданной области пространства. Указанная область пространства может быть двумерной, причем как плоской, так и изогнутой поверхностью [5, 6], а также трехмерной областью объема [7].

Из скалярной теории дифракции хорошо известно, что распределение световой энергии пучка в любой области пространства может регулироваться граничными условиями, описывающими волновой фронт. Таким образом, для синтеза светового поля в выходной области необходимо найти соответствующее распределение волнового фронта в плоскости установки ДОЭ (далее будем называть ее входной). Физически это может быть реализовано с помощью таких ДОЭ, как рельефные киноформы [8], голографические оптические элементы (ГОЭ) [9], цифровые голограммы, записанные на пленках [10], и, наконец, динамические ДОЭ, формируемые с помощью пространственно-временных модуляторов света (ПВМС). Более подробный обзор подходов и способов формирования световых полей и технической реализации представлен в [11].

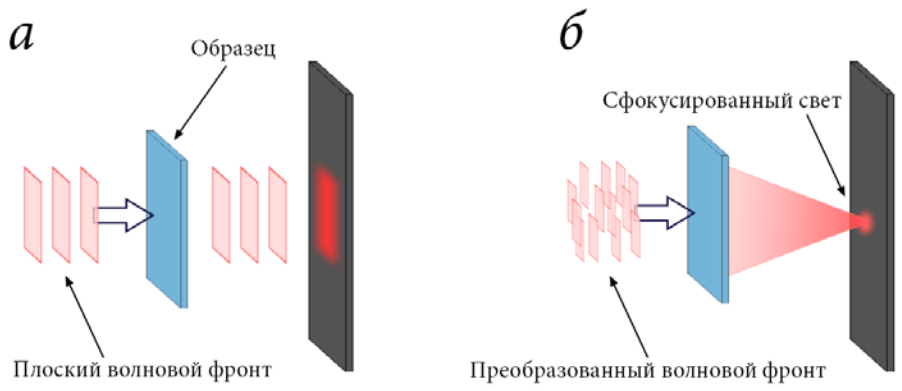
Целью данного исследования является разработка нового подхода к задаче синтеза ДОЭ с помощью ПВМС. Для ее достижения будет использоваться алгоритм адаптивной оптимизации оптического волнового фронта [12], который был разработан при решении задач фокусировки излучения сквозь хаотически рассеивающие среды.

Описание алгоритма адаптивной оптимизации

В результате рассеяния светового излучения при прохождении им среды теряется взаимная связь между соседними сегментами волнового фронта в плоскости наблюдения. Однако согласно принципу Гюйгенса-Френеля каждая точка волнового фронта является источником вторичных сферических волн. Таким образом, поле на входе в рассеивающую среду (во входной плоскости) может быть рассмотрено как совокупность элементарных излучателей, при изменении фазы которых с помощью ПВМС можно менять конфигурацию суммарного волнового фронта в заданной области. Данное представление позволило разработать простой и эффективный алгоритм поиска оптимальной для фокусировки через рассеивающую среду конфигурации элементарных излучателей (сегментов) во входной плоскости. Принцип действия алгоритма можно кратко описать следующим образом: фазовое запаздывание в каждом сегменте последовательно изменяется в диапазоне $(-\pi, \pi]$ с целью обнаружения его оптимального значения, которое обеспечивает максимальный вклад поля в точке фокусировки за рассеивающей средой. Найденная таким образом оптимальная величина фазового запаздывания в данном сегменте сохраняется в память компьютера, и затем процесс повторяется со следующим сегментом. В конечном итоге, находится необходимая фазовая

конфигурация для всего волнового фронта, вследствие чего происходит перераспределение световой энергии в заданную точку на плоскости, т.е. его фокусировка (рис. 1).

Ранее нами был рассмотрен элементарный случай, когда в объектной плоскости отсутствует рассеивающая среда [13]. В этом случае алгоритм адаптивной оптимизации формирует на ПМВС массив оптимальных величин фазового запаздывания (рис. 1б), который представляет собой дискретное представление функции тонкой линзы. Лучи света от источника, пройдя ПВМС, сойдутся в точке в плоскости регистрации. Следовательно, такой подход сам по себе фактически является методом синтеза ДОЭ. Если в качестве мишени использовать не один пиксель матричного фотоприемника, а группу пикселей, то можно получить фазовый ДОЭ, который будет фокусировать волновой фронт в заданное количество точек.



а — Плоский волновой фронт от лазера попадает на ПВМС (не показан на рисунке), где для каждого сегмента выставляется определенное фазовое запаздывание. После этого свет попадает на образец (в данном случае прозрачную пластинку). ПЗС-камера контролирует интенсивность в заданной области (мишень) и обеспечивает обратную связь для алгоритма. б — После подбора оптимальных величин фазового набега для каждого сегмента, большая часть излучения фокусируется в мишень на заданной плоскости.
Рис. 1

Полученные результаты

В рамках данной работы мы разрабатываем подход к созданию ДОЭ, который позволяет приводить излучение от источника в плоскости регистрации к определенному виду. Результаты применения подхода для создания заданной амплитудной структуры показаны на рис. 2.

Равномерно распределенная интенсивность в плоскости ПВМС не показана, так как использовалась чисто фазовая модуляция волнового фронта. В ходе численного моделирования волновой фронта был перераспределен в определенную заданную картину цифры 5 (рис. 2в). При этом в результате расчета мы имеем необходимое фазовое распределение (рис. 2б) для равномерной интенсивности, которое должно быть задано в плоскости ПВМС для получения необходимого распределения.

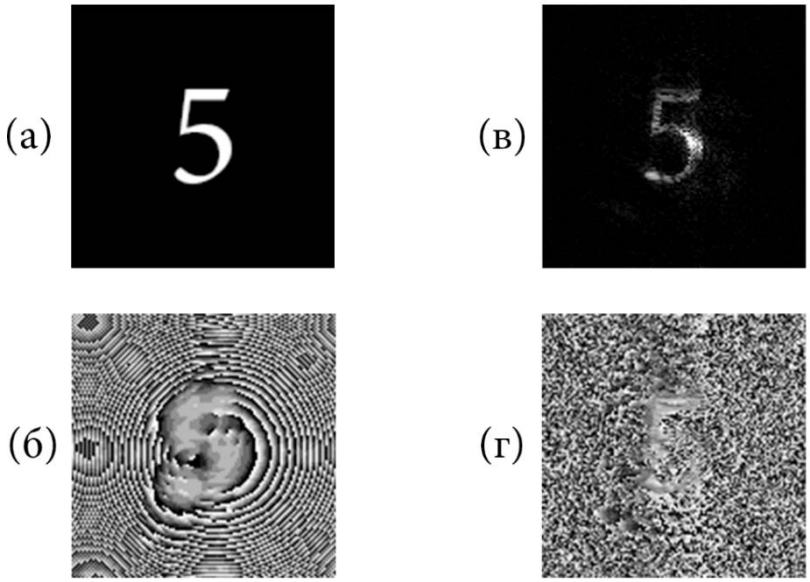


Рис. 2. Заданное распределение интенсивности поля (а) и результат преобразования плоского волнового фронта с равномерно распределенной интенсивностью: фаза (б) в плоскости ПВМС, амплитуда (в) и фаза (г) в плоскости регистрации. Параметры: размер изображения 640×640 мкм, длина волны $\mu = 532$ нм, градаций фазы $i_p = 8$.

Применения

Метод формирования ДОЭ с условием детерминированной разности фаз в качестве обратной связи в алгоритме адаптивной оптимизации может быть применен для создания устойчивых распределений волновых полей от лазерного источника, таких как, например, сингулярные пучки различной сложности. Кроме формирования статических распределений, метод может быть использован для создания динамических преобразователей волновых фронтов в проблемах оптической телекоммуникации и задачах оптической информатики.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (договор МК-7068.2016.2).

Источники

[1] Weiner A. M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators // Review of scientific instruments. — 2000. — Vol. 71. — №5. — P. 1929–1960.
[2] Kohler C. Optimally tuned spatial light modulators for digital holography / C. Kohler, X. Schwab, W. Osten // Applied optics. — 2006. — Vol. 45. — №5. — P. 960–967.
[3] Ahderom S. et al. Applications of liquid crystal spatial light modulators in optical communications // High Speed Networks and Multimedia Communications 5th IEEE International Conference on. — IEEE, 2002. — P. 239–242.
[4] Horstmeyer R. Guidestar-assisted wavefront-shaping methods for focusing light into biological tissue / R. Horstmeyer, H. Ruan, C. Yang // Nature Photonics. — 2015. — Vol. 9. — №9. — P. 563–571.
[5] Kress B. Digital diffractive optics: An introduction to planar diffractive optics and related technology / B. Kress, P. Meyrueis. — Wiley-VCH, 2000. — 2000. — 396 p.
[6] Сойфер В.А. Дифракционная компьютерная оптика. — М.: ФИЗМАТЛИТ. — 2007.
[7] Piestun R. Spatiotemporal control of ultrashort optical pulses by refractive–diffractive–dispersive structured optical elements / R. Piestun, D.A.B. Miller // Optics letters. — 2001. — Vol. 26. — №17. — P. 1373–1375.
[8] Фишман А.И. Фазовые оптические элементы–киноформы // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — Том 12. — С. 76–83.

[9] Lukin A.V. Holographic optical elements // Journal of Optical Technology. — 2007. — Vol. 74. — №1. — P. 65-70.
[10] Burge J.H. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics // Proc. SPIE. — 1995. — Vol. 2576. — P. 258–269.
[11] Kim H. Diffractive optic synthesis and analysis of light fields and recent applications / H. Kim, K. Choi, B. Lee // Japanese journal of applied physics. — 2006. — Vol. 45. — №8S. — P. 6555.
[12] Vellekoop I. M. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media / I.M. Vellekoop, A.P. Mosk // Optics letters. — 2007. — Vol. 32. — №. 16. — P. 2309–2311.
[13] Petrov N.V. Investigation of interaction of structured illumination with random scattering media / N.V. Petrov, A.E. Goryunov, P.V. Pavlov // SPIE Proc. — 2014. — P. 92050T.

The use of adaptive optimization algorithm for the specified amplitude and phase characteristics of the wavefront

T.A. Vovk, N.V. Petrov
Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

Nowadays, the most advanced technology of diffractive optical elements (DOE) synthesis is a dynamic spatial light modulator (SLM). Herewith this kind of devices is divided into liquid-crystal (LCD SLM) and micro-electromechanical (ME SLM) systems. Light field synthesis methods using dynamic DOE provide solutions of problems that require complex configuration of the optical field, such as laser beam shaping [1], digital holography applications [2], the formation and transmission of optical information [3], micro-objects and biological cells manipulation [4].

The primary function of the DOE is a synthesis of required optical field distribution in a predetermined domain (target-region). The specified target-area can act as flat or curved surface [5, 6], as well as three-dimensional domain [7].

From the scalar diffraction theory, it is well known that the distribution of the optical beam intensity can be adjusted by the boundary conditions that describe the wavefront. Thus, the main objective for a synthesis of the optical field in the output target-region is to locate the appropriate field distribution in the surface of specified input plane (DOE installation plane) and then manipulate produced wavefront with dynamic DOE. The boundary condition of the wavefront surface can be realized by ribbed DOEs [8], holographic optical elements (HOEs) [9], digital holograms recorded on films [10], and the dynamic DOE SLM of phase type. A more detailed review of the DOEs is presented in [11].

The aim of this study is to develop a new approach to the problem of the DOE dynamic synthesis via SLM. To achieve the claimed result, the algorithm of optical wavefront adaptive optimization will be used [12]. This algorithm was created to solve the problem of optical beam focusing through randomly scattering media. Previously an elementary case was considered when there is no scattering medium in the object plane [13]. The developed approach to the synthesis of the DOE was used to set the amplitude distribution in the target-plane.

C2.4 Управление мощностью и модуляция лазерного излучения с применением уголкового отражателя с дифракционным элементом

В.А. Комоцкий, В.И. Корольков, Ю.М. Соколов, Н.В. Суетин
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Введение

Ранее [1–3] были описаны устройства, предназначенные для модуляции лазерного излучения с использованием глубокой отражающей фазовой дифракционной решетки (ДР). Изменение мощности в отраженном пучке нулевого порядка дифракции происходило в результате изменения угла наклона ДР по отношению к пучку лазера и сопровождалось изменением направления выходного модулированного оптического пучка. Для того чтобы направление выходного пучка не изменялось, в новой конструкции модулятора мы применили блок уголкового отражателя (БУО) с дополнительным зеркалом, расположенным под прямым углом к отражающей ДР.

Описание схемы устройства

Схема устройства изображёна на рис. 1.

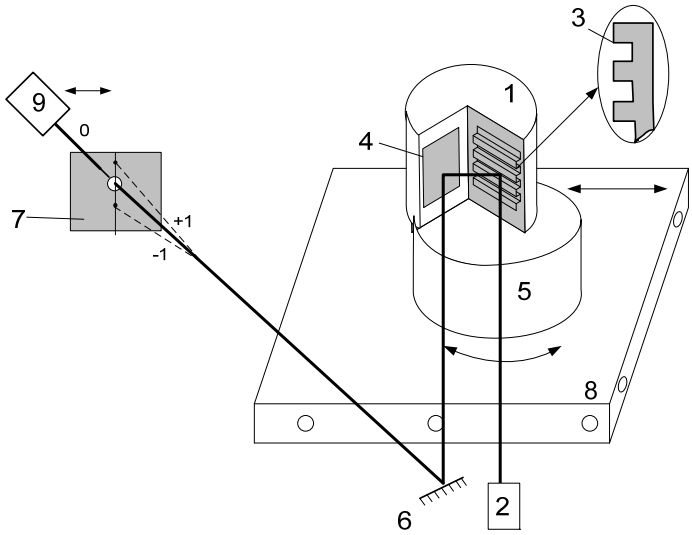


Рис. 1. Схема модулятора с уголковым отражателем

Устройство содержит БУО (1), расположенный на пути пучка излучения лазера (2). На одной из плоскостей БУО установлена глубокая рельефная отражающая ДР (3) с высоким коэффициентом отражения, с прямоугольным профилем в форме меандра. Глубина рельефа ДР $h_{ДР}$ обычно в несколько раз больше длины волны λ модулируемого излучения. Линии ДР расположены в плоскости падения — отражения лазерного пучка. На второй плоскости БУО закреплено зеркало (4) с высоким коэффициентом отражения. Плоскости ДР и зеркала расположены под прямым углом и образуют уголковый отражатель, который возвращает падающий на него пучок излучения лазера в противоположном направлении. После отражения от БУО излучение распадается на дифракционные порядки и затем, после отражения от вспомогательного зеркала (6), направляется на диафрагму (7), которая выделяет из дифракционной картины только нулевой порядок. Для измерения выходной мощности излучения в нулевом порядке дифракции установлен фотодетектор (9). БУО установлен на ось привода (5), который обеспечивает его повороты на заданные углы. Ось вращения привода

лежит в плоскости ДР и перпендикулярна плоскости падения отражения лазерного излучения. При условии, что ось вращения проходит через центр области падения лазерного пучка на ДР, оптический пучок от лазера не будет смещаться по плоскости ДР при повороте БУО. Направление выходного пучка излучения после отражения от зеркала (4) не изменяется при повороте БУО вокруг оси. Если управление поворотом БУО осуществляется с помощью шагового двигателя, то схема может быть использована для управления мощностью лазерного излучения. Если же в качестве привода используется электромагнитный вибратор, схема позволяет осуществлять модуляцию излучения. Механический привод с БУО установлен на координатном столике (8), который обеспечивает перемещение и поворот для установки устройства в оптимальное положение по отношению к входному лазерному пучку.

Экспериментальный макет устройства для управления мощностью был изготовлен по схеме на рис. 1. Рельефная отражающая ДР была изготовлена с применением технологий фотолитографии и химического травления подложки из стекла с последующим вакуумным напылением непрозрачной отражающей алюминиевой плёнки на поверхность рельефа. Глубина рельефа экспериментального образца составляла $3{,}7 \pm 0{,}3$ мкм. Зеркала (4) и (6) представляли собой стеклянные подложки с напыленной алюминиевой пленкой. Коэффициент отражения зеркал и ДР $R \approx 84\%$. Блок уголкового отражателя и корпус устройства были изготовлены с использованием 3D печати. В качестве привода первого типа мы применили шаговый двигатель с редуктором 28BYJ-48. Шаг привода составляет 0,0878°. Управление приводом осуществлялось платой с микроконтроллером Arduino Nano. Для контроля мощности оптического пучка после диафрагмы был установлен фотодетектор, состоящий из фотодиода ФД-24К с резистором нагрузки. При этом на нагрузке измеряли напряжение, пропорциональное мощности падающего оптического излучения.

В ходе эксперимента была измерена зависимость мощности в нулевом порядке дифракции от номера шага шагового двигателя. Экспериментальная зависимость напряжения на фотодетекторе от номера шага привода представлена на рис. 2. Конструкция исследуемого уголкового отражателя позволяет работать в диапазоне углов падения 14,5–68,5°, чтобы отраженный от ДР луч не выходил за пределы вспомогательного зеркала (4), установленного на второй плоскости БУО. Поэтому измеренная зависимость, приведенная на рис. 2 начинается с 165-го шага (в качестве нулевого шага мы приняли положение, при котором лазерный пучок падает по нормали к плоскости решетки). Дополнительно на рис. 2 нанесена вертикальная пунктирная линия, соответствующая углу падения лазерного пучка на решетку 45°. Этот угол хорошо согласуется с симметрией уголкового отражателя. Вблизи этой позиции расположен возрастающий участок, на котором мощность излучения в нулевом порядке дифракции меняется от минимального (практически нулевого) до максимального значения, равного $P_{\text{эфф}}$. Протяженность этого участка равна 41 шагу привода (что соответствует углу поворота на 3,6°). Таким образом, устанавливая БУО в определенное положение, мы можем регулировать мощность излучения на выходе устройства (в данном случае с дискретностью порядка 1/40). Этот эксперимент показывает возможность прецизионной регулировки мощности лазерного излучения на выходе устройства от практически нулевого до максимального значения.

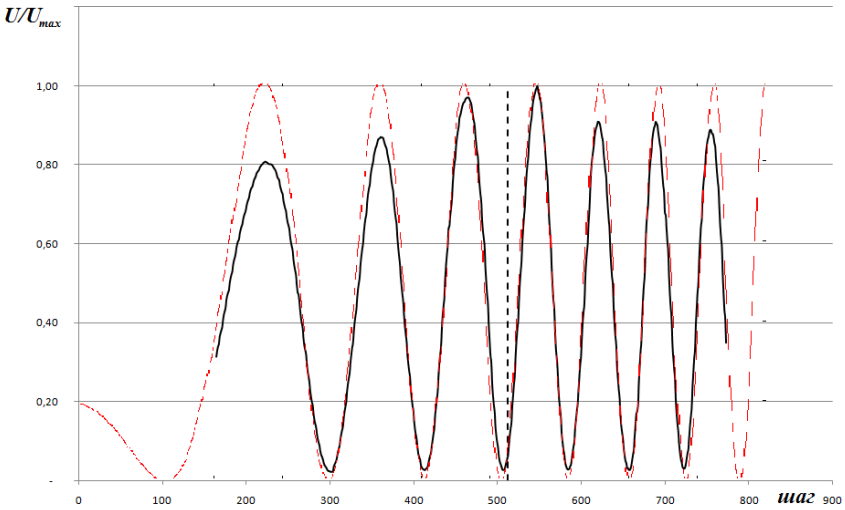


Рис. 2. Зависимость мощности в нулевом порядке дифракции от номера шага привода. Сплошной чертой отмечена экспериментальная характеристика, пунктирной — расчетная зависимость для решетки с глубиной, равной глубине экспериментального образца.

На базе описанной выше схемы с БУО также можно осуществлять непрерывную аналоговую модуляцию лазерного излучения. В этом случае использовался привод второго типа — электромеханический вибратор, осуществляющий непрерывный (не дискретный) поворот БУО. **Экспериментальный макет модулятора** был собран в соответствии с рис. 1. На рис. 3 представлены графики сигналов на резисторе нагрузки фотодетектора при разных значениях амплитуды колебаний механического привода.

Проведенные эксперименты с приводом второго типа подтверждают возможность получения линейной аналоговой модуляции мощности лазерного пучка во времени в пределах глубин модуляции до 80%. Устройство позволяет осуществлять практически 100% модуляцию выходного лазерного пучка, однако в этом случае форма выходного сигнала существенно отличается от формы гармонического сигнала, который подавался на электромеханический вибратор.

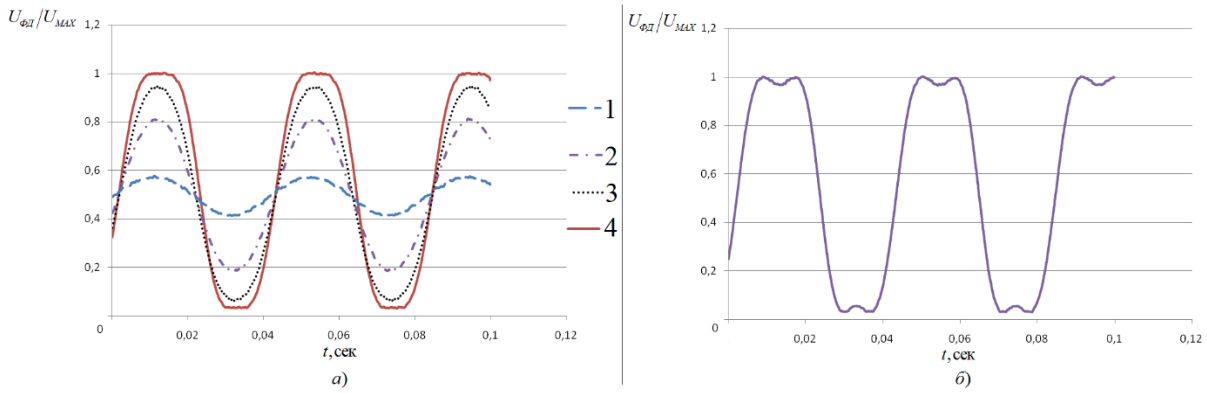


Рис. 3. Эпюры напряжений на резисторе нагрузки фотодетектора при различных амплитудах угловых колебаний привода. Графики на рис. 4а соответствуют модуляции на одном склоне зависимости $P_0(\theta)$. График на рис. 4б соответствует выходу за пределы одного склона.

В рамках данной работы была испытана новая схема управления мощностью лазерного излучения. Эксперименты показали возможность как дискретной регулировки мощности лазерного излучения с большим числом дискретных точек, так и возможность непрерывной аналоговой модуляции излучения лазера. Длина волны используемого в экспериментах лазера

составляет $\lambda = 0{,}6328$ мкм, однако предложенная и исследованная здесь конструкция может быть применена и для источников с другой длиной волны. При этом необходимо изменить параметры ДР и применить отражающие покрытия зеркал и ДР, обладающие высоким коэффициентом отражения на соответствующей длине волны.

Источники

[1] Комоцкий В.А. Модулятор когерентного излучения дифракционного типа / В.А. Комоцкий, Ю.М. Соколов, Е.В. Басистый // Сборник научных трудов всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. — М.: НИЯУ МИФИ. — С. 140.
[2] Комоцкий В.А. Модулятор лазерного излучения / В.А. Комоцкий, Ю.М. Соколов, Е.В. Басистый // Р.Э. — 2012. — Том 57. — №6. — С. 1–4.
[3] Патент №2411620 РФ, G02B 26/02. Модулятор лазерного излучения / В.А. Комоцкий, Ю.М. Соколов. — 13.08.2009, 2011, Бюл. №4.
[4] Комоцкий В.А. Исследование оптоэлектронного датчика угловых смещений и колебаний на основе глубокой отражательной фазовой дифракционной решетки / В.А. Комоцкий, Ю.М. Соколов, А.Н. Алексеев, Е.В. Басистый // Вестник РУДН. Сер. Физика. — 2009. — №4. — С. 95.
[5] Комоцкий В.А. Метод измерения глубины периодических рельефных отражателей акустических волн лазерным зондированием / В.А. Комоцкий, Ю.М. Соколов, Е.В. Басистый // Р.Э. — 2011. — Том 56. — №2. — С. 243–248.

Laser radiation power control and modulation with use of corner reflector supplied by diffractional unit

V.A. Komotskii, V.I. Korol'kov, Y.M. Sokolov, N.V. Suetin
Peoples Friendship University of Russia, Moscow, Rassia

We have developed, constructed and investigated a new device for laser radiation power control and modulation. The scheme of the device is shown on Fig. 1. It consists of corner reflector (CR) (1) with deep reflective diffraction grating (3) with a profile of a meander on one plane and mirror (4) on the second. CR is installed on an axis of electromechanical driver (5) which is located on a path of a beam from laser (2). After reflecting from diffraction grating (3) radiation splits into diffraction orders and reflects from mirror (4) in the opposite direction. The mirror (6) is added to direct laser beam to spatial filter (7) which separates output beam, zero-diffraction order. Photodetector (9) can be set-up to control output radiation. Corner reflector (CR) coupled with electromechanical driver was installed on a tunable table (8) for initial tuning of the device.

Experimental models

Output beam can be controlled by turning CR on the axis of driver [1–3]. If we use stepper motor as a driver, the device can be used to control output power. We used stepper motor 28BYJ48 (one step is equal to 0.0878°) controlled by Arduino Nano. The depth of experimental diffraction grating was 3.7 μm. We used He–Ne laser with a wavelength of 0.63 μm. To control the power of the optical beam after the diaphragm has been set photodetector composed of a photodiode FD24K with a load resistor. The voltage across load resistor is proportional to the power of the incident to the photodiode optical radiation.

During experiment we measured the dependence of the power in the zero diffraction order of the number of stepper motor step. Experimental dependence of voltage on the photo detector from the driver step number is shown in Fig. 2.

Additionally, in Fig. 2 applied to the vertical dashed line, corresponding to the angle of incidence of the laser beam on the grating equal to 45°. This angle is in good agreement with the corner reflector symmetry. Close to this position there is a growing area in which the radiation power in zero diffraction order varies from minimal (practically zero) to a maximum value. The length of this area equals 41 driver steps (which corresponds to the rotation through an angle of 3.6°). Thus, by setting CR in certain position, we can adjust the output power (in this case with discontinuity about 1/40). This experiment demonstrates the possibility of high-precision adjustment of the laser power output from practically zero to a maximum value by using the proposed scheme.

If we use electromagnetic actuator as a driver, the device can be used to perform continuous analogue modulation of the laser radiation. Fig. 3 shows graphs of signals at the photodetector resistor load for different values of the amplitude of the mechanical vibrations of the driver.

The experiments with the actuator confirmed the possibility of obtaining a linear analog modulation of the power of the laser beam in time within the depth of modulation up to 80%. The apparatus allows practically 100% modulation of the output laser beam, but in this case, the output waveform is substantially different from that of a harmonic signal that is fed to the electromechanical actuator.

In this work a new coherent radiation power control scheme has been tested. Experiments have shown the possibility of adjustment as the discrete laser power control with a large number of discrete points, and the possibility of continuous analog modulation of the laser radiation. The wavelength of the laser used in the experiments is 0.63 μm. The scheme studied can be designed for modulation of lazer radiation of different wavelength. In that case it is necessary to change parameters of diffraction grating.

References

[1] Komotskii V.A. Diffractive laser radiation modulator / V.A. Komotskii, Yu.M. Sokolov, E.V. Basisty // Collection of scientific works of the All-Russian conference on photonics and information optics. — M.: NRNU MEPhI. — P. 140.

[2] Komotskii V.A. Laser radiation modulator / V.A. Komotskii, Yu.M. Sokolov, E.V. Basisty // Radiotechnics and electronics. — 2012. — Vol. 57. — №6. — P. 1–4.

[3] patent №2411620 RF, G02B 26/02. Laser radiation modulator / V.A. Komotskii, Yu.M. Sokolov. — 13.08.2009, 2011, Bul. №4.

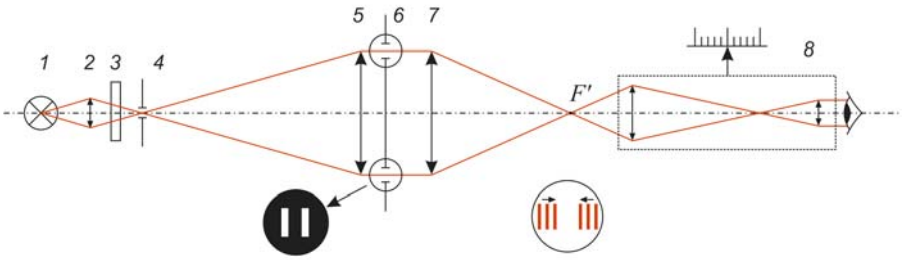
[4] Komotskii V.A. Small linear and angle displacement sensor with deep reflective diffraction grating investigation / V.A. Komotskii, Yu.M. Sokolov, A.N. Alexeev, E.V. Basisty // Bulletin of PFUR. Physics. — 2009. — №4. — P. 95.

[5] Komotskii V.A. Method of measuring of periodic acoustic reflectors depth with laser probing / Komotskii V.A., Sokolov Yu.M., E.V. Basisty // Radiotechnics and electronics. — 2011. — Vol. 56. — №2. — P. 243–248.

C2.5 Применение дифракционных оптических элементов для измерения сферической аберрации

С.С. Копёнкин[1], Ю.П. Бородин[1], Д.С. Копёнкин[2], В.В. Дружин[3]
[1] Московский технологический университет, Москва, Россия
[2] ФГУП «НТЦ «Атлас», Москва, Россия
[3] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Для оценки соответствия реальных аберраций их теоретическим значениям выполняют измерение остаточных аберраций корригированных оптических систем. С целью измерения сферической аберрации наиболее широкое применение получил метод визуальных фокусировок, предложенный академиком В.П. Линником в 1949 году. Этот метод основан на определении координат точек пересечения с задней фокальной плоскостью лучей, прошедших через отдельные зоны входного зрачка контролируемого объектива (1). Метод позволяет измерить продольную и поперечную сферическую аберрацию. Схема измерения показана на рис. 1.



1 — источник света, 2 — конденсор, 3 — светофильтр, 4 — раздвижная щель, 5 — коллиматор, 6 — диафрагма с двумя парами параллельных щелей, 7 — испытуемый объектив, 8 — микроскоп
Рис. 1. Схема измерения сферической аберрации объектива

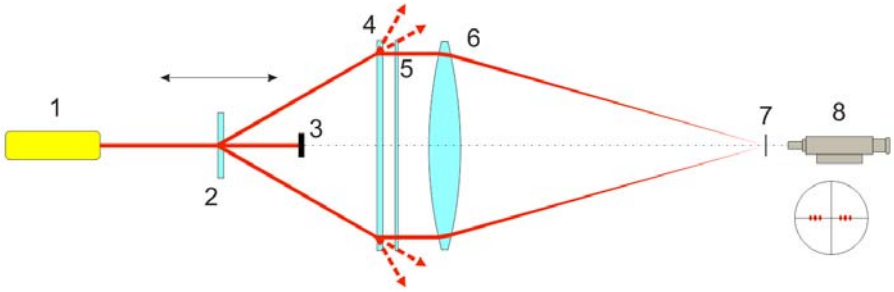
Суть метода заключается в следующем: параллельный пучок лучей, образованный коллиматором 5, падает на диафрагму 6, в которой меняется расстояние между двумя парами параллельных щелей (2). Положение точки пересечения лучей с оптической осью определяется путем совмещения дифракционных картин, каждая из которых образуется в фокальной плоскости испытуемого объектива 7. Меняя расстояние между двумя парами щелей m, делают отсчеты по шкале продольных перемещений микроскопа DS'. По результатам измерений строят график продольной сферической аберрации объектива $m/2D = f(DS')$, где D — диаметр входного зрачка испытуемого объектива. При измерении поперечной сферической аберрации Dy' используется только одна пара щелей диафрагмы 6, а значение перемещения дифракционной картины измеряется с помощью окуляра-микрометра наведением на центральную светлую линию.

К недостаткам указанного метода следует отнести необходимость использования вспомогательных оптических элементов, например, коллиматора от оптической скамьи ОСК-2 с фокусным расстоянием 1500 мм и подвижной диафрагмы 6 с механизмом перемещения щелевых отверстий (3).

Авторы предлагают модификацию известного метода на основе применения дифракционных оптических элементов (ДОЭ), что значительно упрощает схему установки для измерения сферической аберрации. В качестве ДОЭ используются рельефно-фазовые голограммы, записанные на фоторезисте, что позволяет исключить влияния угловой и

спектральной селективности, присущей объемным фазовым голограммам. Кроме того, периоды обоих ДОЭ одинаковы.

Оптическая схема установки для измерения сферической аберрации показана на рис. 2.



1 — полупроводниковый лазер, 2, 4 — ДОЭ, 3 — экран для блокировки нулевого порядка, 5 — амплитудная дифракционная решетка (АДР), 6 — испытуемый объектив, 7 — матовый экран, 8 — микроскоп
Рис. 2. Оптическая схема измерительной установки

Луч от лазерного источника 1 проходит первый ДОЭ 2 и разделяется на три луча (0-й и ± 1 дифракционные порядки). 0-й порядок при проведении измерений используется для юстировки оптической схемы установки и перед проведением измерений будет перекрываться непрозрачным экраном 3. +1 и −1 порядки попадая на второй ДОЭ 4 в свою очередь сами дифрагируют. В измерениях участвуют те порядки, которые распространяются параллельно оптической оси. Изменяя расстояние между ДОЭ 2 и 4, можно изменять расстояние между выходящими параллельными лучами, которые пройдя через АДР 5 попадают на испытуемую линзу 6. Лучи, прошедшие через АДР, образуют в фокальной плоскости испытуемой линзы дифракционную картину, которая наблюдается через окуляр микроскопа 8 на матовом экране 7, жестко закрепленного на оправе микрообъектива. Т.к. пространственный АДР период вдвое превышает ширину прозрачного участка, глаз наблюдает дифракционную картину, состоящую из трёх линий. Как и в случае «классической» схемы, при проведении измерений необходимо совмещать две дифракционные картины. Использование матового экрана 7 позволяет использовать микрообъектив с любой числовой апертурой, что важно при исследовании светосильных объективов. При измерении поперечной сферической аберрации используется 0-ой порядок и один из лучей, вышедших из ДОЭ 4.

В заключении следует отметить, что предложенная модификация известного метода Линника на основе использования ДОЭ для измерения продольной и поперечной сферической аберраций объективов имеет ряд преимуществ:

- существенно упрощается конструкция установки,
- в качестве источника света используется маломощный полупроводниковый лазер ($P < 1$ мВт),
- простота юстировки оптической схемы и точной установки исследуемого объектива,
- измерение аберраций объективов большого диаметра благодаря возможности изготовления ДОЭ больших размеров.

Благодаря этому метод становится прост, удобен для автоматизации в лабораторных и производственных условиях и, кроме того, эффективен как с экономической, так и с технической точек зрения,

Источники

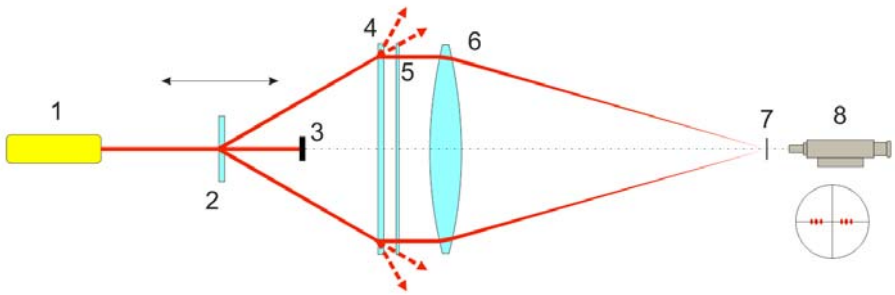
[1] ГОСТ 20826−75. Объективы съемочные. Метод измерения продольной сферической аберрации (с Изменением №1).

[2] Креопалова Г.В. Оптические измерения / Г.В. Креопалова, Н.Л. Лазарева, Д.Т. Пуряев. — М.: Машиностроение, 1987. — 263 с.
[3] Афанасьев В.А. Оптические измерения. — М.: Высш. школа, 1981. — 229 с.

Measuring of spherical aberrations using diffractive optical elements

S.S. Kopenkin[1], Yu.P. Borodin[1], D.D. Kopenkin[2], V.V. Druzhin[3]
[1] Moscow Technological University, Moscow, Rassia
[2] FGUP "STC "Atlas", Moscow, Rassia
[3] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Rassia

We developed a modification of the known method originally proposed by academician Linnik for measuring the transverse aberrations. Modification includes the use of the two holographic optical elements (DOE) having the same fringe period. Each DOE represent the the relief-phase hologram recorded on photoresist, which allows eliminating the influence of angular and spectral selectivity related to volume phase holograms. The optical layout of proposed setup for measuring spherical aberration shown in Fig. 1.



1 — Laser diode (LD), 2, 4 — DOE, 3 — screen for elimination zero-order diffraction beams, 5 — amplitude diffraction grating, 6 — lens under test, 7 — screen, 8 — microscope.
Fig. 2. Optical layout of the measuring setup

The beam from the laser source 1 passes through the first DOE pos. 2 and splitting into three beams (0th and $\pm 1^{th}$ diffractive orders). 0th order is used for aligning the optical scheme with screen 3. +1 and −1 orders falling on the second DOE with pos. 4. In the measurements involved diffraction orders that extend parallel to the optical axis. By changing the distance between DOE 2 and DOE 4, it is possible to change the distance between the emerging parallel rays, which are passing through grating 5 fall on the lens under the test 6. Focused on the screen 7 rays are observing with the microscope 8. When measuring the transverse spherical aberration is used 0th order and one of the beams emerging from the diffraction grating 4.

In conclusion, it should be noted that the proposed method has several advantages such as significantly simplified design with use of simple light source with low, about 1 mW power laser diode, has easy adjustment of the optical scheme and the accurate position of the examined lens, possibility for measurement of large diameter lenses due to the possibility of manufacturing large diffraction grating.

C2.6 Когерентные осветительные системы для голографических дисплеев

С.С. Копенкин[1], Ю.П. Бородин[1], А.Н. Путилин[2], А.В. Морозов[3], С.Е. Дубынин[3]
[1] Московский технологический университет, Москва, Россия
[2] Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия
[3] Исследовательский центр Самсунг, Москва, Россия

В последнее время наблюдается повышенный интерес к голографическим 3D-дисплеям как в сфере развлечений, так и при проектировании и моделировании сложных процессов и устройств. Для производителей мобильных устройств и систем отображения информации различного назначения (будь то рекламные стенды или домашние телевизоры) это неоспоримое конкурентное преимущество, как перед обычными 2D-системами, так и перед автостереоскопическими, которые все чаще ошибочно или умышленно называют голографическими. И этим на фоне непрерывного роста производительности и мощностей мобильных устройств можно привлечь интерес конечного потребителя. Голографический дисплей в данном случае рассматривается в качестве устройства для отображения полноценного 3D изображения, формируя заданный волновой фронт с помощью таких оптических явлений как интерференция и дифракция.

Благодаря этому, голографический дисплей обеспечивает реалистичные полноценные трехмерные изображения без специальных поляризационных очков, которые вызывают напряжение глаз и усталость. Когда речь заходит об интерференции и дифракции, то нужно понимать, что для работы такого устройства требуется когерентный источник излучения (1, 3).

В данной статье рассматривается устройство когерентного освещения для голографического дисплея с использованием лазерного излучения. Эти системы подсветки обеспечивают равномерное и эффективное освещение в устройствах визуализации (2). Обычно в выставочных макетах голографических дисплеев применяются устройства фоновой подсветки с линзовыми коллиматорами и расширителями пучка, которые являются довольно громоздким. И делая упор на демонстрацию возможностей голографических экранов, мало кто уделяет внимание минимизации толщины таких осветительных систем, которые могут быть применены в голографических дисплеях с целью их популяризации и коммерциализации. Толщина является одним из ключевых параметров, в современных системах задней подсветки, которые должны быть сведены к минимуму, чтобы уменьшить общую толщину дисплея. Хотя некоторые попытки предпринимались к созданию компактных расширителей лазерного луча, основанные на использовании планарного волновода. Но они позволяют расширять пучок лишь по одной координате.

Нами предлагается тонкий блок когерентной подсветки для мобильного голографического дисплея. Этот модуль задней подсветки состоит из стеклянной подложки-волновода и двух поверхностных дифракционных решеток, полученных с помощью двухлучевой интерференции. Две поверхности решетки используются, в частности, для ахроматизации, поскольку волноводная дифракционная решетка обладает огромной хроматической дисперсией. Красный, зеленый и синий компоненты вводятся в волновод первой дифракционной решеткой и распространяются в нем под разными углами, которые могут быть компенсированы выходной решеткой для каждого канала.

Входным является коллимированный пучок от трех диодных лазеров, генерирующих когерентный свет с длинами волн 473, 532 и 633 нм. Пучок сначала вытягивается по одной координате с помощью волноводного расширителя пучка, а затем вводится во второй планарный волновод, из которого излучение равномерно выводится на всем его протяжении. Плоские дифракционные решетки были использованы в качестве вводного и выводного

элементов связи (4). В этом случае выходное излучение останется коллимированным (рис. 1а). Период решеток ограничен несколькими условиями. Так как распространение света в волноводе основано на явлении полного внутреннего отражения, то угол дифракции излучения на входной решетке должен быть больше угла полного внутреннего отражения (ПВО). Это критический угол для всех длин волн. Угол дифракции имеет наименьшее значение для синего света, таким образом, условие ПВО должно выполняться в первую очередь для длины волны 473 нм (рис. 1б, сплошная линия). Во-вторых, более высокий порядок дифракции должен оставаться в волноводе. Это условие также должно выполняться для синего излучения (рис. 1б, прерывистая линия). В то же время большой волноводный угол означает больший диаметр входного пучка, что влияет на габариты системы, и меньшее количество переотражений в волноводе, что сказывается на однородности подсветки. Также и суммарная дифракционная эффективность уменьшается с увеличением угла падения за счет уменьшения числа отражений внутри волновода. Таким образом, волноводный угол не должен превышать некоторого максимального угла γ, для всех длин волн. Красный свет аналогично дифрагирует в волновод, только угля гораздо больше, таким образом, имеем следующую систему уравнений (1), где Λ является периодом решетки, λ_B самая короткая длина волны используемого света (в нашем случае 473 нм), λ_R является самой большой длиной волны используемого света (в нашем случае 635 нм), α является углом, под которым излучение вводится в волновод, n — показатель преломления материала волновода, γ — максимально возможный угол распространения света внутри волновода.

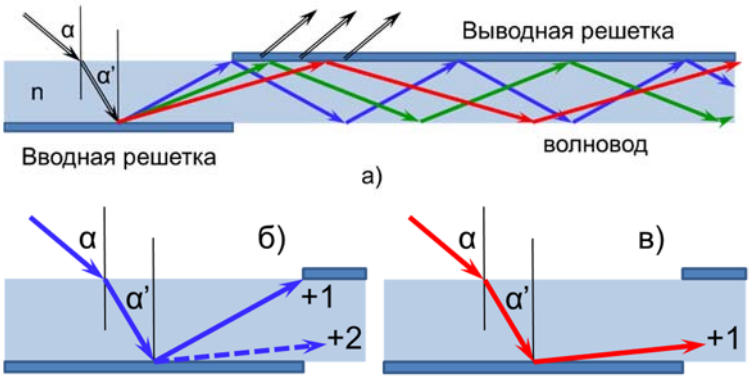


Рис. 1. Принцип действия системы подсветки

$$\begin{cases} \Lambda \geq \dfrac{\lambda_B}{1-\sin\alpha}, \\ \Lambda \geq \dfrac{2\lambda_B}{n-\sin\alpha}, \\ \Lambda \leq \dfrac{\lambda_R}{n\sin\gamma-\sin\alpha}. \end{cases} \quad (1)$$

Решетка, отвечающая заданным параметрам, была записана на фоторезисте марки Shipley S1813 G2, используемого в литографии, при помощи He—Cd лазера с длиной волны 442 нм. Излучение He—Cd лазера, пройдя через микрообъектив и точечную диафрагму, коллимируется с помощью зеркально-линзовой системы, состоящей из линзы и вогнутого зеркала (рис. 2). На фоторезисте регистрируется интерференционная картина двух лучей с s-поляризацией, падающих на регистрирующую среду под углом 26.2° к нормали. Соотношение сигнал-опора варьируется в диапазоне 1:1 ≈ 1:50.

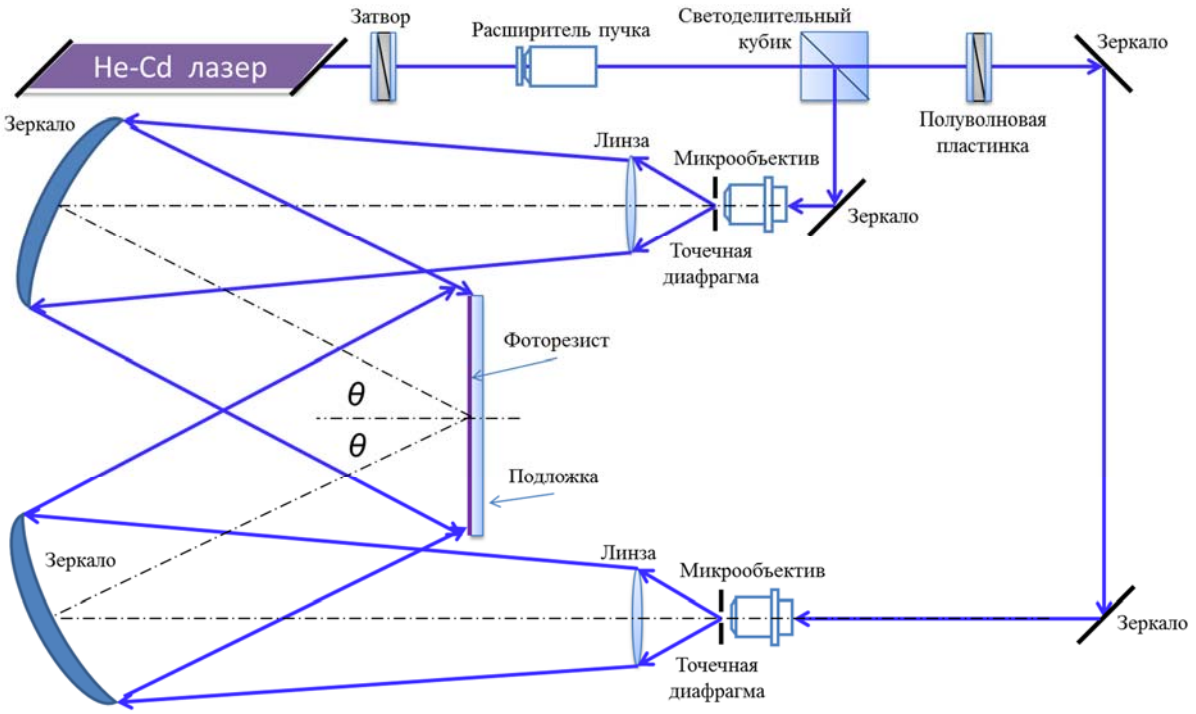


Рис. 2. Оптическая схема записи

Заключительным этапом получения осветительной системы является перенос рельефа решетки с фоторезиста на поверхность волновода. Данная процедура осуществляется с помощью УФ-отверждаемого полимера (4).

На стадии демонстрации и измерений излучение вводится в волновод с помощью одномодового волокна. Измерения однородности проводятся в соответствии со стандартом VESA для мониторов.

В заключении стоит отметить, что была получена рабочая система подсветки, полностью удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к системам подсветки экранов, размером 150×85 мм (для панели диагональю 5,5 дюймов с рабочей областью 126×75 мм) и толщиной всего 0,7 мм. С помощью данного модуля подсветки была восстановлена статическая полноцветная голограмма. Суммарная дифракционная эффективность данного модуля не высока, но в данном случае стояла задача получения однородного коллимированного пучка ахроматического когерентного света (5,6). Считаем, что данный модуль может применяться в коммерческих целях в качестве подсветки экранов мобильных устройств.

Источники

[1] Choi C.-S. Ultra-slim coherent backlight unit for mobile holographic display / C.-S. Choi, A.V. Morozov, et al. // SPIE Proc. — 2015. — Vol. 9556. — P. 955606.
[2] Putilin A. Application of holographic elements in displays and planar illuminators / A. Putilin, I. Gustomiasov // SPIE Proc. — 2007. — Vol. 6637. — P. 66370N.
[3] Patent Application №20160147003 US. Backlight unit for holographic display apparatus and holographic display apparatus including the same / A. Morozov A., et al. — 2016.
[4] Patent Application №20160065955 US. Backlight unit and holographic display including the same / KIM, et al. — 2016.
[5] Patent 20160033710 US. Backlight unit for holographic display / KIM, et al. — 2016.
[6] Patent Application 2014146782 RU. Scanning ultra slim coherent backlight unit / A. Morozov, et al. — 2014.

Coherent backlight units for holographic display

S.S. Kopenkin[1], Yu.P. Borodin[1], A.N. Putilin[2], A.V. Morozov[3], S.E. Dubynin[3]
[1] Moscow Technological University, Moscow, Rassia
[2] P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Rassia
[3] Samsung R&D Institute, Moscow, Rassia

There has been a renewal of interest in 3D display technologies recently. Holographic display is considered as an ultimate technique for displaying 3D images because it can reproduce the original optical wave by interference and diffraction.

Because of this, holographic display provides realistic images without special eyewear and eye strain and fatigue.

This article describes illumination devices for holographic display using coherent radiation from laser source. These backlighting systems are providing uniform and effective illumination in visualization devices. Backlight units (BLU) using conventional lens, which is bulky, have been used for a holographic display, but very few attempts have been made in minimizing the thickness of back light units that can be applied to a flat panel holographic display. Thickness is one of the key parameters in modern backlighting systems that should be minimized to reduce the overall thickness of the display. Although some efforts have been made on compact beam expanders for lasers, using planar waveguide method, they can have only one-dimensional expansion.

We propose slim coherent backlight unit for a mobile holographic display. This backlight unit consists of glass substrate (waveguide) and two surface gratings produced by two-beam interference. Two surface gratings are used to solve chromatic dispersion problem, whereas one surface grating has very high chromatic aberration. Red, green, and blue components propagate in waveguide separately with different angles, which can be compensated by output grating for each channel.

Input is collimated beam with three wavelengths (red, green and blue) or polychromatic light. Waveguide was used to expand input light to the demanded area. Plane diffraction gratings were used as in- and outcoupling elements. In this case output light will keep its collimation characteristics as they were at the input due to no additional elements (Fig. 1a). The period of gratings is limited by several conditions. First is, since waveguide light propagation is based on total internal reflection phenomena, the diffraction angle of the input light on the input grating should be greater than total internal reflection (TIR) critical angle for all wavelengths. Angle of diffraction is smallest for the blue light, so, should be less than TIR angle for (Fig. 1b, solid line). Second, higher diffraction order should be after the input grating. Again blue light is the one who'll achieve this condition sooner (Fig. 1c, dashed line). On the same time larger waveguiding angle means larger input beam diameter, which is inconvenient to work with. Also diffraction efficiency decreases with increasing of incidence angle due to reduction of the number of reflections inside of waveguide. Thus waveguiding angle should not exceed some maximum angle γ for all wavelengths. Red light diffract at larger angels so it violates this condition. First, thereby, taking into account Snell's law, diffraction equation and sign convention, given conditions turns into following system of equations (1), where Λ is surface grating period, λ_B is shortest wavelength of the used light (in our case 473 nm), λ_R is the largest wavelength of the used light (in our case 635 nm), α is incident angle of the light at the waveguide, n is waveguide material refractive index, γ is maximal possible propagation angle of the light inside of waveguide.

$$\begin{cases} \Lambda \geq \dfrac{\lambda_B}{1-\sin\alpha}, \\ \Lambda \geq \dfrac{2\lambda_B}{n-\sin\alpha}, \\ \Lambda \leq \dfrac{\lambda_R}{n\sin\gamma-\sin\alpha}. \end{cases} \quad (1)$$

The grating is recorded in a S1813 G2 photoresist using a He–Cd laser with wavelength 442 nm using interference lithography system. The laser light from this He–Cd laser is collimated beam using an objective lens, a pinhole, a lens and a concave mirror as shown in Fig. 2. The grating was written by two s-polarized beams with incident angle of 26.2° normal to the photoresist plate and the beam ratio of 1:1 ≈ 1:50. The period (Λ) of the grating, housed in according to the equation 1, can be controlled by changing the included angle θ of the two beams.

Final fabrication procedure of slim backlight unit was transferring of grating profile onto thin glass substrate by UV-polymer copying.

Measurements of uniformity were carried out according with VESA Standard.

In conclusion, it should be noted that the area of backlight illumination is 150×85 mm (5.5 inch panel size is 126×75 mm), and the thickness is 0.7 mm which is thin enough compared to other conventional backlight units. The static full-color hologram was reconstructed by this backlight unit. The total diffraction efficiency of the backlight unit is not high, but in this case there was the task to achieve a high uniform achromatic collimated beam of coherent light (uniformity more 80% over the whole area). It can be used as a slim BLU for the mobile holographic display.

C2.7 Ахроматизация волноводных и ПВО голограмм

А.Н. Путилин[1], А.В. Морозов[1, 2], С.Е. Дубынин[1, 2]
[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия
[2]Исследовательский центр Самсунг, Москва, Россия

Использование волноводных и ПВО голограмм в настоящее время становится наиболее актуальной задачей при разработке как научных, так и приборов потребительской электроники. Главными отличиями такого класса голографических элементов являются компактные размеры и возможность сохранять не дифрагированный пучок внутри волновода или оптического элемента. Основным недостатком как волноводных, так и ПВО голограмм является сильная хроматическая дисперсия, которая ограничивает применение подобных элементов. В данной работе, мы рассматриваем возможности ахроматизации таких элементов для применения в реальных оптических системах.

Хроматизм волноводных голографических элементов определяется в соответствии с выражением (1):

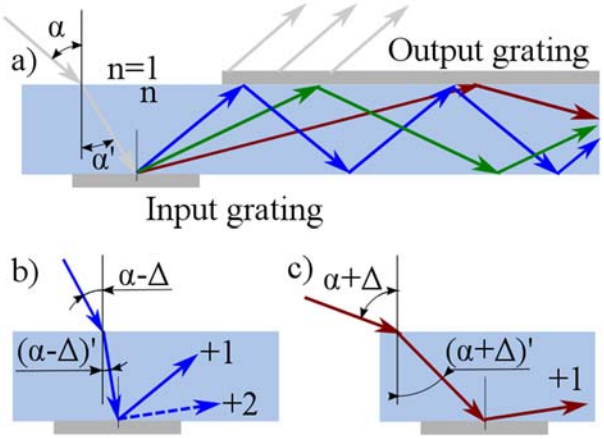
$$d = \frac{m\lambda}{\sin\alpha + n\sin\theta}, \tag{1}$$

где, d — период голографической решётки, m — номер дифракционного порядка, λ — длина волны излучения, α — угол падения излучения в воздухе, θ — угол дифракции в материале, n — показатель преломления материала волновода.

Ахроматизация волноводных голограмм может быть достигнута путём взаимной компенсации хроматизма входной и выходной решётками, как это показано на рис. 1a. В качестве дополнительного требования к системе задаётся возможное отклонение угла падения излучения в воздухе ($\alpha \pm \Delta$) и значение максимального угла дифракции излучения в волноводе (θ_{max}). В этом случае, период решётки ограничивается несколькими условиями. Первое, учитывая что в основе работы волновода лежит эффект полного внутреннего отражения, угол дифракции на входной решётке должен быть строго больше угла ПВО для всех длин волн и всех углах падения. Наименьший угол дифракции оказывается для синего света, таким образом, в процессе сканирования он первым может оказаться менее угла ПВО (рис. 1b, сплошная линия). Второе условие — отсутствие второго порядка дифракции после входной решётки. Снова, синий свет первый, кто может нарушить данное условие (рис. 1b, прерывистая линия). В тоже время, наибольший волноводный угол означает наибольший диаметр входного пучка, что оказывается не удобным для последующей работы. Одновременно, дифракционная эффективность выводной решётки уменьшается с увеличением угла падения. Таким образом, волноводный угол не должен превышать некоего максимального значения θ_{max} в процессе сканирования. Учитывая, что красный свет дифрагирует сильнее остальных, он и является определяющим для этого ограничения. Принимая во внимание закон преломления, уравнение дифракции и правило знаков, указанные ограничения можно записать в виде системы уравнений (2).

$$\begin{cases} d \geq \dfrac{\lambda_B}{1-\sin(\alpha-\Delta)}, \\ d \geq \dfrac{2\lambda_B}{n-\sin(\alpha-\Delta)}, \\ d \leq \dfrac{\lambda_R}{n\sin\theta_{max}-\sin(\alpha+\Delta)}. \end{cases} \tag{2}$$

Выполнение всех условий (2) позволяет создать полностью ахроматизированное решение волноводной осветительной системы с возможностью сканирования угла излучения на выходе для широкого спектрального диапазона длин волн.



a — принципиальная схема ахроматизированной волноводной системы подсветки; b — к условию ограничений для коротковолновой области спектра; c — к условию ограничения для длинноволновой области спектра
Рис. 1

Источники

[1] Patent Application №P2014-0115687 KR. Back light unit and holographic display including the same / Hong-Seok Lee, et al. — 2014.
[2] Patent Application №2014146782 RU. Scanning ultra slim coherent backlight unit / A.V. Morozov et al. — 2014.

Achromatization of waveguide and TIR holograms

A.N. Putilin[1], A.V. Morozov[1, 2], S.E. Dubynin[1, 2]
[1] Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2] Samsung R&D Institute, Moscow, Rassia

This time, it became most actual task to use waveguide and TIR holograms during development of scientific devices as well as consumer electronics. The core differentiation points of such type of holographic elements are: compact size and possibility to keep non-diffracted beam inside of waveguide or optical element. Main disadvantage of waveguide and TIR holograms is high chromatic dispersion limiting application of such elements. In this work we taking into account possibility to make achromatization of these elements in real optical systems.

The chromaticism of waveguide holographic elements is defined in accordance with equation (1):

$$d = \frac{m\lambda}{\sin\alpha + n\sin\theta}, \tag{1}$$

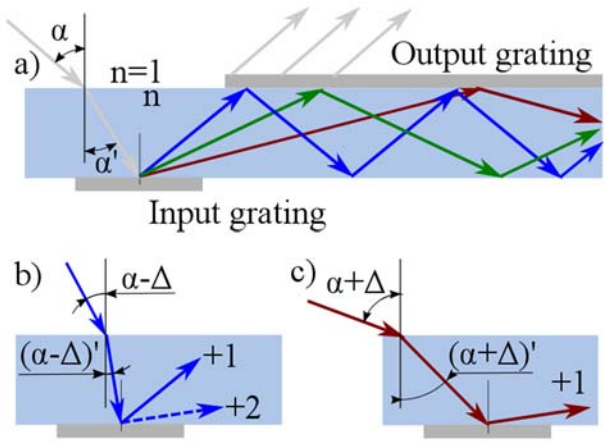
where, d — is diffraction grating period, m — diffraction order number, λ — radiation wavelength, α — radiation incidence angle in air, θ — diffraction angle inside of material, n — waveguide material refractive index.

Achromatization of waveguide holograms can be achieved by meant of self-compensation of chromaticism of input and output gratings, as it shown on Fig. 1a. Additional requirements to the system are possibility to steering incidence angle ($\alpha \pm \Delta$) and maximum

diffraction angle inside of waveguide (θ_{max}). In this case, period of gratings is limited by several conditions. First is, since waveguides work is based on total internal reflection, diffraction angle on the input grating during steering should stay greater than one of TIR for all wavelengths. Angle of diffraction is smallest for blue light, during steering it will be first to become less than TIR angle (Fig. 1b, solid line). Second condition is absence of second order of diffraction after input grating. Again blue light is the one who'll achieve this condition sooner (Fig. 1b, dashed line). On the same time bigger waveguiding angle means bigger input beam diameter which is inconvenient to work with. Also diffraction efficiency decreases with increasing of incidence angle. Thus waveguiding angle should not exceed θ_{max} during steering for all wavelengths. Because red light rotates radically, it is first to violate this condition. Thereby, taking into account Snell's law, diffraction equation and sign convention, given conditions turns into system of equations (2).

$$\begin{cases} d \geq \dfrac{\lambda_B}{1-\sin(\alpha-\Delta)}, \\ d \geq \dfrac{2\lambda_B}{n-\sin(\alpha-\Delta)}, \\ d \leq \dfrac{\lambda_R}{n\sin\theta_{max}-\sin(\alpha+\Delta)}. \end{cases} \quad (2)$$

Realization of all conditions (2) allowing create fully achromatize solution of waveguide illumination system with steering of radiation incidence angle at input of it for wide spectral range.



a — principle scheme of achromatize waveguide illumination system; b — to the short wavelength limitation conditions; c — to the long wavelength limitation condition.
Fig. 2

C2.8 Подавление спекл-шума с помощью электрооптической ячейки с негеликоидальным сегнетоэлектрическим ЖК

А.Л. Андреев, Т.Б. Андреева, И.Н. Компанец, Н.В. Заляпин
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Рассматривается метод подавления спекл-шума в формируемых лазером изображениях с помощью быстродействующей электрооптической ячейки с сегнетоэлектрическим жидким кристаллом (СЖК), в котором геликоид отсутствует (компенсирован). Указаны характер деформации смектических слоёв в электрическом поле и механизм пространственно-неоднородной фазовой модуляции проходящего через ячейку лазерного пучка с разрушением в нём фазовых соотношений. Результаты представлены в сравнении с более ранними результатами, когда использовалась электрооптическая ячейка с геликоидальным СЖК.

Введение

В работах [1, 2] показано, что электрическое поле переменной частоты вызывает образование в слое геликоидального СЖК случайно распределенных по объему градиентов показателя преломления, которые приводят к пространственно-неоднородной модуляции фазовой задержки глубиной порядка и более π, что позволяет разрушить фазовые соотношения в лазерном пучке, проходящем через слой СЖК, и, как следствие этого, подавить спекл-шум в формируемом лазером изображении. Механизмом подавления является хаотичное по объёму слоя СЖК изменение положения индикатрисы рассеяния при одновременной подаче на электрооптическую СЖК-ячейку низкочастотного и высокочастотного управляющего напряжения.

С помощью такого пространственного модулятора света — деспеклера на основе ячейки с геликоидальным СЖК толщиной 18 мкм достаточно простым способом реализована модуляция фазовой задержки электрическим полем 2 В/мкм и частотой 500 Гц проходящего через ячейку светового излучения и продемонстрировано подавление спеклов в изображениях.

В данной работе использовался СЖК, в котором геликоидальная закрутка директора в объеме была подавлена за счет взаимодействия хиральных добавок с противоположными знаками оптической активности. Эксперименты показали, что деспеклер на основе электрооптической ячейки с негеликоидальным СЖК имеет ряд особенностей и преимуществ по сравнению с рассмотренным выше.

Экспериментальные результаты

Переориентация директора (главной оптической оси) в негеликоидальном СЖК происходит за счет движения пространственно локализованных волн стационарного профиля — солитонов, возникающих при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии. При определенных условиях возникновение волн стационарного профиля приводит к образованию структуры переходных доменов, и как следствие этого, к рассеянию света [3].

В зависимости от времени воздействия электрического поля на структуру СЖК, иначе, от длительности импульсов управляющего напряжения, наблюдаются (рис. 1) несколько максимумов эффективности светорассеяния — контрастного отношения. Увеличение длительности импульсов приводит к увеличению длины доменных границ и переходу к нерегулярным рассеивающим структурам. Как следствие этого, плотность рассеивающих центров уменьшается, что, в свою очередь, приводит к уменьшению эффективности светорассеяния.

Переходы между светорассеивающими модами, которым соответствуют максимумы эффективности светорассеяния, при одновременной подаче на электрооптическую ячейку импульсов напряжения, длительность которых соответствует различным максимумам, приводят к хаотичному изменению положения индикатрисы рассеяния. В результате кратковременного (менее 50 мкс) включения светорассеяния в СЖК формируются структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления по объему слоя, что, в свою очередь, является причиной пространственно-неоднородной по сечению пучка фазовой модуляции света в электрооптической ячейке.

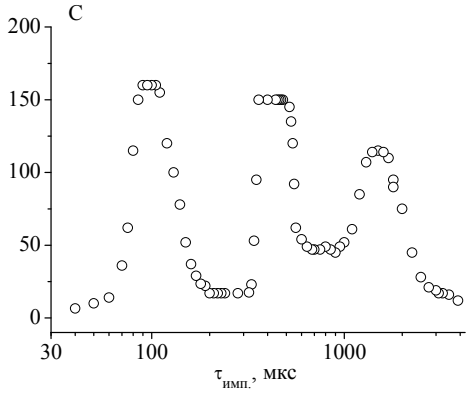


Рис. 1. Зависимость эффективности светорассеяния от длительности импульсов биполярного напряжения при фиксированной амплитуде. Амплитуда импульсов ±50 В. Толщина электрооптической ячейки 18 мкм.

Пространственно-неоднородная модуляция фазовой задержки, глубина которой порядка и более π, позволяет разрушить фазовые соотношения в лазерном пучке, проходящим через электрооптическую ячейку, и, как следствие этого, подавить спекл-шум в изображении [4].

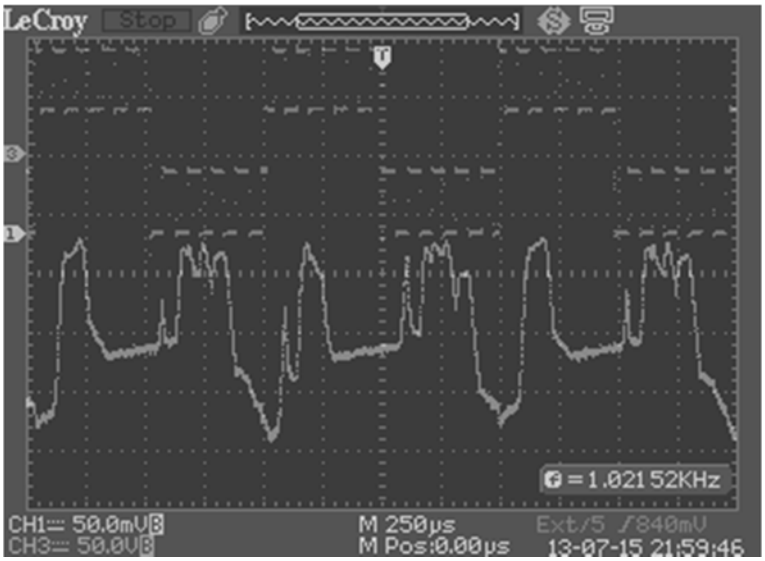
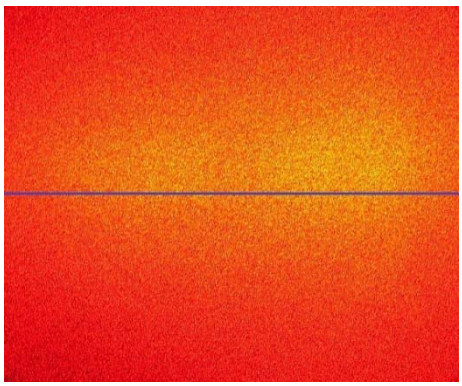


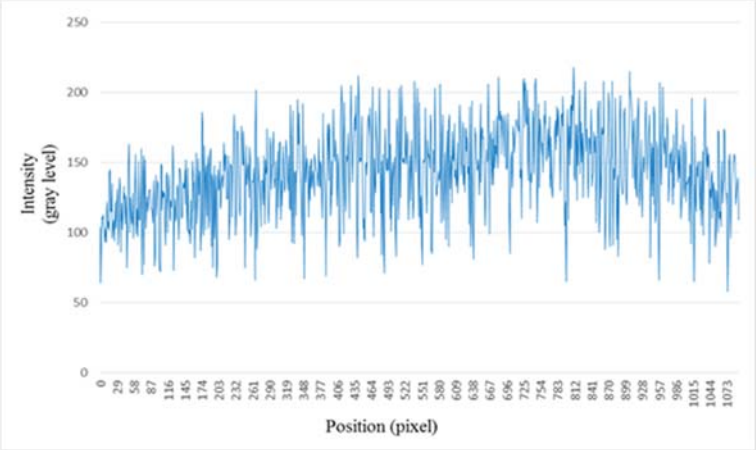
Рис. 2. Осциллограммы управляющего напряжения, приложенного к ячейке с негеликоидальным СЖК (вверху), и оптического отклика — модуляции фазовой задержки (внизу)

Появление градиентов показателя преломления вдоль смектических слоев происходит при инверсии знака электрического поля (полярности импульсов управляющего напряжения), что является следствием нелинейного механизма переориентации директора за счет движения солитонных волн. Фазовая модуляция с высокой степенью неоднородности достигается (рис. 2)

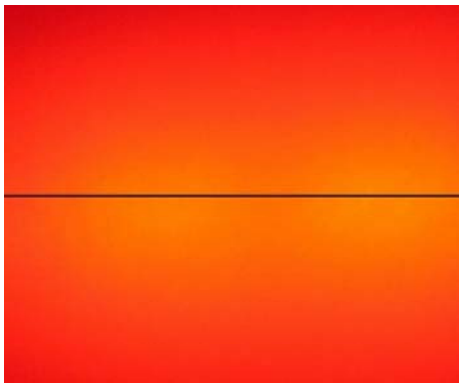
электрическим полем 2 В/мкм при амплитудной модуляции низкочастотного напряжения (здесь 1 кГц) высокочастотным напряжением (10 кГц) такой же прямоугольной формы (меандр).



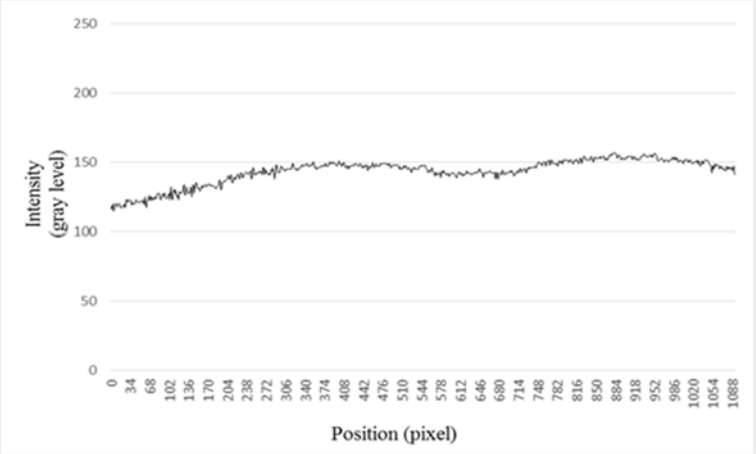
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Фотографии (а, в) и сканы (б, г) распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую СЖК-ячейку в отсутствие (а, б) и при приложении (в, г) управляющего напряжения на ее электродах. Длина волны лазерного излучения — 0,65 мкм; толщина слоя СЖК — 18 мкм; низкочастотное напряжение ±36 В, 2 кГц; высокочастотное напряжение ±36 В, 10 кГц.

Амплитуда, длительность и частота следования импульсов выбиралась таким образом, чтобы эффективность светорассеяния изменялась за время действия каждого из последовательности импульсов, но не достигала бы своего максимального значения. Следствием выбранного режима электрического возбуждения является пространственно-неоднородная фазовая модуляция света глубиной до 4π, которая приводит к разрушению фазовых соотношений в проходящем через СЖК ячейку лазерном пучке и подавлению спекл-шума в изображении (рис. 3а, б, в, г). При этом искажения в спектральном составе модулируемого излучения не наблюдались.

Заключение

Эксперименты показали, что деспеклер на основе электрооптической ячейки с негеликоидальным СЖК имеет преимущества по сравнению с деспеклером, в котором использовался геликоидальный СЖК. Пространственно-неоднородная фазовая модуляция света знакопеременным электрическим полем порядка 2 В/мкм в негеликоидальном СЖК позволила осуществить эффективное подавление спекл-шума на вчетверо большей частоте модуляции и позволила исключить искажения в спектральном составе модулируемого

излучения и светорассеяние в отсутствие электрического поля, обусловленное наличием геликоида.

Авторы благодарят за поддержку работы Российский фонд фундаментальных исследований (грант 14-07-00185-а) и Программу фундаментальных исследований Президиума РАН.

Источники

[1] Андреев А.Л., Андреева Т.Б., Компанец И.Н., Минченко М.В., Пожидаев Е.П. // Квантовая электроника. — 2008. — Том 38. — №12. — С. 1166–1170.
[2] Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Minchenko M.V., Pozhidaev E.P. // Journal of the SID. — 2009. — Vol. 17. — №10. — P. 801–807.
[3] 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.
[4] Andreev A.L. Speckle noise suppression using a helix-free ferroelectric liquid crystal cell / A.L. Andreev, T.B. Andreeva, I.N. Kompanets, N.V. Zalyapin // Quantum Electronics. — 2014. — Vol. 44. — №12. — P. 1136–1140.

Speckle noise suppression using a helix-free ferroelectric liquid crystal cell

A.L. Andreev, T.B. Andreeva, I.N. Kompanets, N.V. Zalyapin
P.N. Lebedev Phsical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The method for suppressing speckle noise in images produced by a laser beam is considered. A fast-response electro-optical cell with a helix-free ferroelectric liquid crystal (FLC) is used for this. The character of deformations of smectic layers in an electric field is described as well as the mechanism of the destruction of phase relations in a beam due to spatially inhomogeneous phase light modulation.

In this work, the helix winding of the director in FLC layer was suppressed due to the interaction of chiral additives with opposite signs of optical activity. Experiments have shown that FLC based spatial light modulator, which suppresses speckles in laser images (i.e. a despeckler), possesses a number of features and benefits compared to those considered in [1, 2], were helix FLC was used.

Reorientation of the director (principal optical axis) in helix-free FLC is due to the motion of spatially localized waves of stationary profile — the soliton arising from the transition to the Maxwell mechanism of energy dissipation. Under certain conditions, the occurrence of such solitons results in the formation of the structure of transient domains, and as a consequence, to the scattering of light [3, 4].

Depending on the duration of the electric field action onto the FLC structure, i.e. on the duration of control voltage pulses, several maxima of scattering efficiency were observed (see Fig. 1). The transitions between scattering modes under the action of control voltage pulses with a duration corresponding to various maxima of light scattering caused the chaotic change of the scattering indicatrix positions.

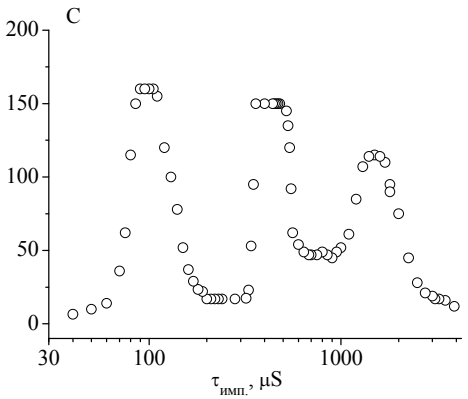
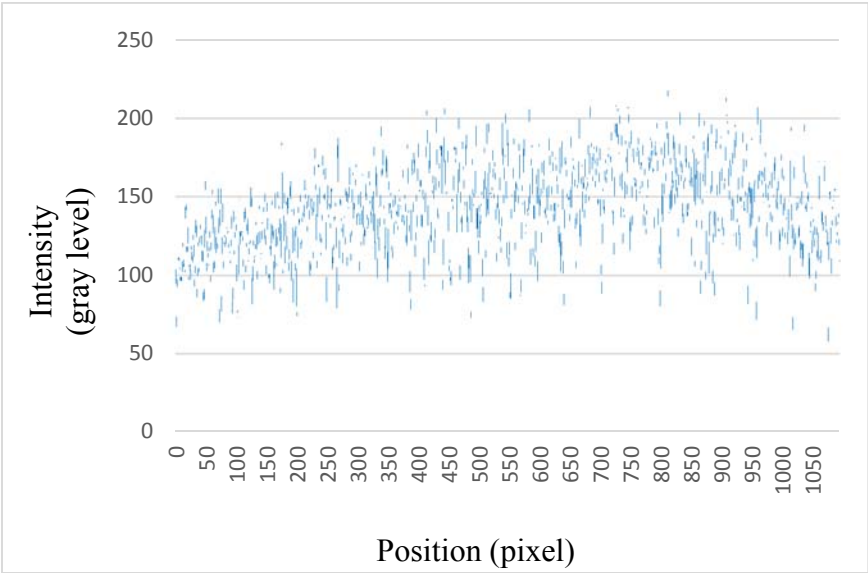
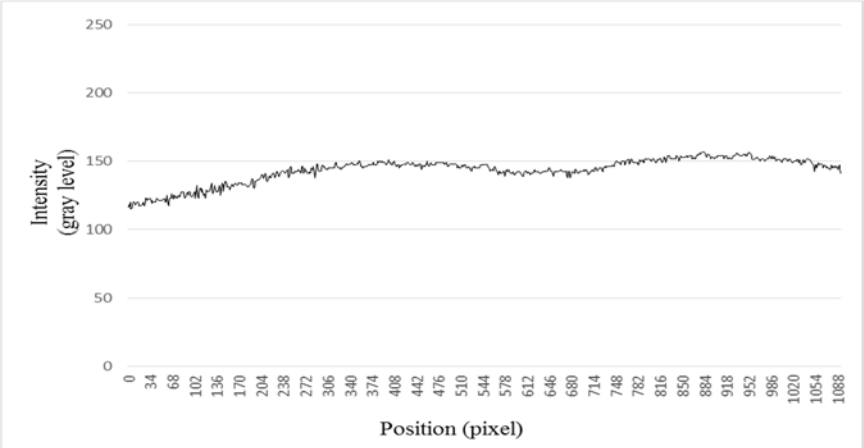


Fig. 1. Efficiency of light scattering of an electro-optical helix-free FLC cell (the thickness is 18 μm) versus the control voltage pulse duration at the amplitude ±50 V



a)



b)

Fig. 2. Scans of the radiation intensity distribution in the cross section of the laser beam passing through FLC cell in the absence (a) and application (b) of the control voltage. The laser wavelength — 0.65 μm; FLC layer thickness — 18 μm; low-frequency voltage ±36 V, 1 kHz; high-frequency voltage — ±36 V, 10 kHz.

The appearance of gradients of the refractive index along the smectic layers took place with an inversion of the sign of the electric field, which is a consequence of the nonlinear mechanism of reorientation of the director due to the motion of soliton waves. Highly inhomogeneous phase

modulation was attained by the electric field (tension of 2 V/μm) applied simultaneously at low frequency (up to 2 kHz) and high frequency (up to 10 kHz). The amplitude, duration and pulse repetition rate were selected so that the spatially non-uniform phase modulation of light (depth of up to 4π) resulted in the destruction of phase relations in the laser beam passing through the FLC cell, and suppression of the speckle noise in images (see Fig. 2). Distortion in the spectral composition of the modulated radiation was not observed.

Results of measurements show that spatially inhomogeneous phase modulation of light by an alternating electric field of about 2 V/μm in the helix-free FLC cell provides the effective suppression of the speckle noise.

References

[1] Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Minchenko M.V., Pozhidaev E.P. // Quantum Electronics. — 2008. — Vol. 38. — 1166.

[2] Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Minchenko M.V., Pozhidaev E.P. // Journal of the SID. — 2009. — Vol. 17. — №10. — P. 801–807.

[3] 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.

[4] Andreev A.L. Speckle noise suppression using a helix-free ferroelectric liquid crystal cell / A.L. Andreev, T.B. Andreeva, I.N. Kompanets, N.V. Zalyapin // Quantum Electronics. — 2014. — Vol. 44. — №12. — P. 1136–1140.

C2.9 Методы синтеза фазовых дифракционных оптических элементов алгоритмом «пинг-понг»

М.Н. Кулаков, П.А. Черёмхин
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Для задач информационной и дифракционной оптики в настоящее время широко используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ), например, в качестве [1–2]:

- корректоров волновых фронтов,
- оптических коммутаторов,
- преобразователей в системах обработки изображений,
- фокусаторов и др.

К числу наиболее распространённых ДОЭ относятся голограммы и киноформы. Киноформ несёт информацию только о фазовой составляющей объектной волны и позволяет её восстанавливать при освещении волновым фронтом. К числу наиболее широко используемым методам оптического восстановления информации с киноформов относится их вывод на пространственно-временные модуляторы света [3]. Наиболее популярными методами синтеза киноформов являются алгоритмы Герчберга-Сэкстона [1] и Фьенапа [2], а также их модификации [1]. Эти методы направлены в первую очередь на синтез фазовых ДОЭ для восстановления информации о «плоских» объектах [4].

Для синтеза киноформов объемных сцен можно использовать методы «пинг-понг» [5]. Метод «пинг-понг» был предложен для синтеза ДОЭ, позволяющих восстанавливать набор «плоских» сфокусированных изображений в различных сечениях этих объемных сцен. В работе рассматривается классический алгоритм «пинг-понг» и его различные модификации [6–8] для расчета фазовых ДОЭ, в том числе и киноформов.

Классическая схема алгоритма «пинг-понг» приведена на рис. 1. Расчет распространения излучения и применение амплитудных и фазовых ограничений производятся между сечениями объемной сцены, соответствующим сфокусированным изображениям объектов (плоскости А и Б). Киноформ создается лишь расчетом распространения излучения до плоскости киноформа в качестве финального шага алгоритма. Расчет распространения излучения между плоскостями А и Б проводится с помощью преобразования Френеля или Фурье (в зависимости от используемой области зоны дифракции).

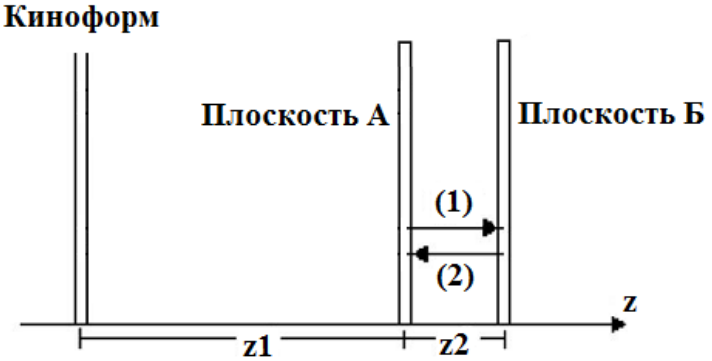


Рис. 1. Схема синтеза киноформов объемных сцен методом «пинг-понг»

Методом многих плоскостей [8] является модификацией метода «пинг-понг». Синтезируемый киноформ воспроизводит два сфокусированных распределения интенсивности на двух разных расстояниях. Фаза рассчитывается с помощью итерационного алгоритма.

Вначале производится расчет распространения излучения от киноформа до одной из плоскостей (А или В) и в обратном направлении. Далее производится расчет излучения до следующей плоскости и обратно (рис. 2). В приведенном примере используются две плоскости, однако их может быть существенно больше.

В аддитивно-итеративном алгоритме [6] расчет распространения излучения для каждой плоскости происходит одновременно (рис. 3), а не последовательно, как представлено в предыдущем методе. Формирование сфокусированных изображений различных объектов происходит на разных расстояниях от плоскости киноформа.

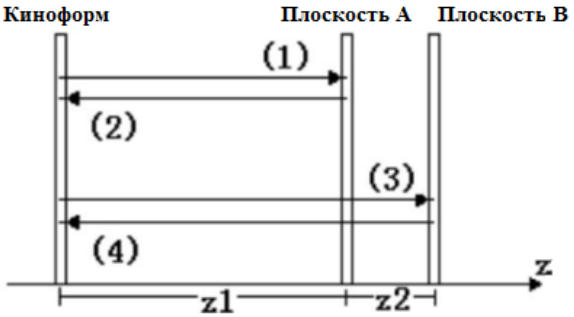


Рис. 2. Схема синтеза киноформов объемных сцен методом многих плоскостей

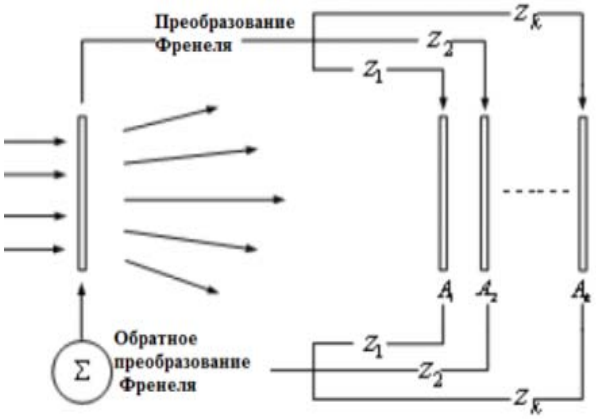


Рис. 3. Схема синтеза киноформов объемных сцен аддитивно-итеративным алгоритмом

Метод последовательного расчета излучения [7] так же является модификацией метода «пинг-понг». Однако, в отличие от методов, приведенных выше, расчет излучения производится последовательно: от одной плоскости к следующей (рис. 4). Распространение излучения производится от киноформа до плоскости А, далее от плоскости А до Б, после чего обращается (обратно до А и до плоскости киноформа).

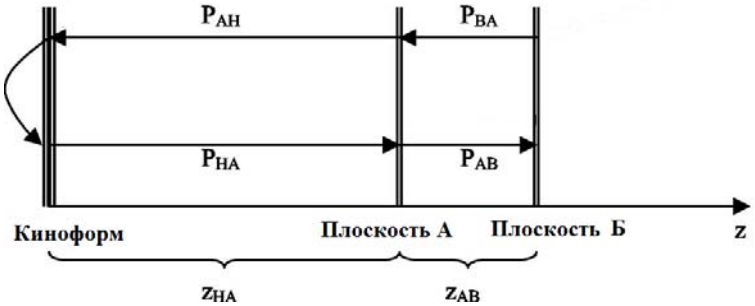


Рис. 4. Схема синтеза киноформов объемных сцен методом последовательного расчета распространения излучения

Существующие модификации позволяют синтезировать ДОЭ для оптической реконструкции сфокусированных изображений объектов в различных плоскостях. Для повышения качества восстановления можно добавить расчеты распространения излучения в различных направлениях, а не только между объектными плоскостями, как в приведенных методах.

Источники

[1] Головашкин Д. Дифракционная компьютерная оптика / Д. Головашкин, Л. Досколович, Н. Казанский, В. Котляр, В. Павельев, Р. Скиданов, В. Сойфер, С. Хонина. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
[2] Fienup J.R. Phase Retrieval Algorithms: a Personal Tour // Appl. Opt. — 2013. — Vol. 52. — P. 45–56.
[3] Toyoda H., et al. Advances in Application of Liquid Crystal on Silicon Spatial Light Modulator // SID Symposium Digest of Technical Papers. — San Diego, 2014. — Vol. 45. — P. 559–562.
[4] Cheremkhin P.A. Comparison of kinoform synthesis methods for image reconstruction in Fourier plane / P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov, L.A. Porshneva, V.G. Rodin, S.N. Starikov // SPIE Proc. — 2014. — Vol. 9131. — P. 913124.
[5] Dorsch R.G. Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display / R.G. Dorsch, A.W. Lohmann, S. Sinzinger // Appl.Opt. — 1994. — Vol. 33. — №5. — P. 869–875.
[6] Xiaoyu J.A. Novel Iterative Computation Algorithm for Kinoform of 3D Object / J.A. Xiaoyu, P. Chuang, W. Xi, Z. Yantao // SPIE Proc. — 2012. — Vol. 8556. — P. 85561H.
[7] Makowski M. Design and applications of multi-plane Fresnel color holograms / M. Makowski, M. Sypek, A. Kolodziejczyk // SPIE Proc. — 2008. — Vol. 7141. — P. 714122.
[8] Ying C.-f., et al. New method for the design of a phase-only computer hologram for multiplane reconstruction // Opt. Eng. — 2011. — Vol. 5. — P. 055802.

Methods of synthesis of phase diffraction optical elements by the “ping-pong” algorithm

M.N. Kulakov, P.A. Cheremkhin
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

Diffraction optical elements (DOE) are widely used [1–2], for example, as wavefronts transducer element, optical switchboards, converters in images processing systems, and etc. Holograms and film forms are examples of the most widespread DOEs. Kinoform is phase DOE that provides information about object wave phase and allows to reconstruct it by lighting. The most popular methods of synthesis of kinoforms are Gerchberg-Saxton, Fienup algorithms and their modifications. These methods are directed to phase DOE synthesis for recovery of “flat” objects images.

For synthesis of phase DOE of 3D-scenes it is possible to use the “ping-pong” method and its’s modifications. The “ping-pong” method allows to DOE synthesis for reconstruction a set of “flat” focused images in various sections of volume scenes. In this work the classical “ping-pong” method and its various modifications are considered.

The classical scheme of “ping-pong” algorithm can be described as follows. Calculation of propagation of illumination and application of amplitude and phase restrictions are performed between sections of a volume scene (focused images of objects). Kinoform is formed as a final step

of algorithm. Calculation of illumination distribution between the object planes is carried out by means of Fresnel or Fourier transforms.

"Many planes method" is modification of the "ping-pong" method. Firstly, propagation of illumination from a kinoform plane to one object plane and in the opposite direction is calculated. Further illumination is propagated to another object plane and backward. Then calculations are performed for other focused object planes. Calculation of propagation of illumination for each plane happens at the same time for the "additive-iterative algorithm". It isn't consecutive as in the case of "many planes method". For the "method of consecutive calculation of illumination" calculation of propagation of illumination is made consistently: from one plane to following (i.e. from a DOE plane to the A plane, then to the B plane, back to the A plane and to the DOE plane).

The existing modifications of the "ping-pong" algorithm allow to synthesize DOE for optical reconstruction of objects images in a number of spatial planes. Quality restoration improvement can be achieved by adding of calculations of propagation of illumination in various directions.

C2.10 Комбинированные дифракционные оптические элементы для оптических устройств отображения информации и систем дополненной реальности

Я.А. Град, С.Б. Одиноков, А.Б. Соломашенко
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Дисплеи и индикаторы являются важной и неотъемлемой частью многих оптических устройств отображения информации и систем дополненной реальности. Использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и световодных пластин позволяет снизить массогабаритные параметры всей системы отображения информации благодаря тому, что в отличие от классических систем выходной зрачок оптической системы не просто проецируется в плоскость расположения глаз оператора, а увеличивается до необходимых размеров за счет наличия световодной пластины с ДОЭ [1–3].

Индикатор представляет собой пластину-подложку 3, с нанесенными на ее поверхность дифракционными оптическими элементами 5 и объемной отражательной решеткой 4 для ввода излучения, осветителя (OLED-дисплей) 1 и коллимирующей системы 2, как показано на рис. 1.

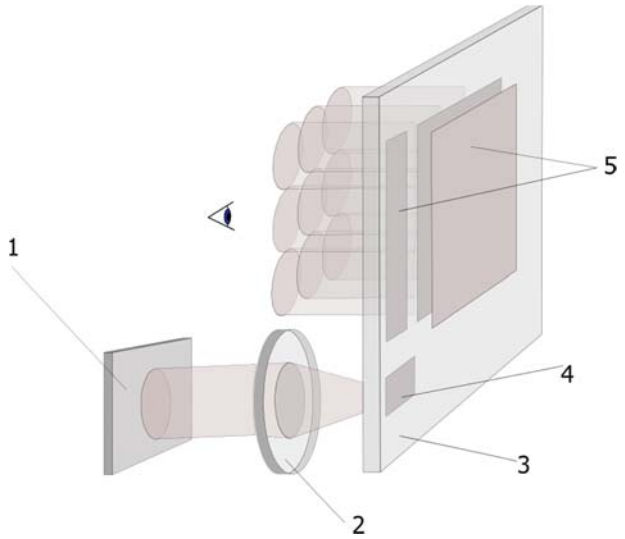


Рис. 1. Схема индикатора для оптических устройств отображения информации

Отличительной особенностью такой системы является использование комбинированной структуры ДОЭ, состоящей из дифракционных решеток 5 для вывода излучения из световода, а также объемной отражательной решетки 4, выступающей в роли спектрального фильтра.

Комбинированная структура ДОЭ [4, 5] в составе индикатора таким образом представляет собой дифракционные решетки с распределенной по площади дифракционной эффективностью [2, 3] для вывода излучения из световода и получения одинаковой яркости изображения по полю, а также объемную решетку с регулируемой спектрально-угловой селективностью для выделения чистых цветов. Кроме того, объемная отражательная решетка позволяет уменьшить спектральное размытие выводимого изображения, а применение нескольких решеток для ввода излучения различных длин волн позволяет получать многоцветное изображение с помощью таких устройств. Фотография описанной выше пластины-подложки представлена на рис. 2.

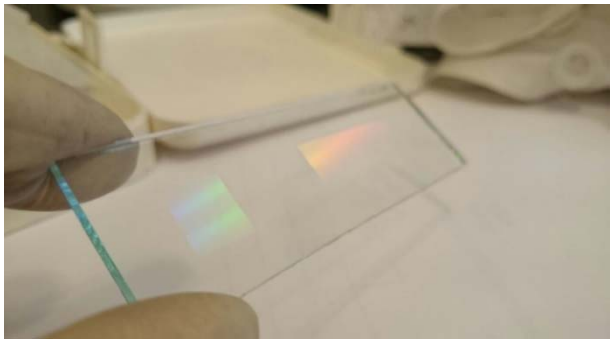


Рис. 2. Фотография экспериментального образца подложки-пластины с ДОЭ

На рис. 3 показано тестовое двухцветное изображение выведенное с помощью пластины с ДОЭ. В качестве источника излучения был использован пикопроектор 3M MP-180. Таким образом показано, что данная схема может быть использована для оптических устройств отображения многоцветной информации и систем дополненной реальности.

Рис. 3. Фотография изображения выводимой информации с помощью индикатора для оптических устройств отображения и систем дополненной реальности

Исследование выполнено в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: соглашение №14.574.21.0066 от 27 июня 2014 года (идентификатор проекта RFMEFI57414X0066).

Источники

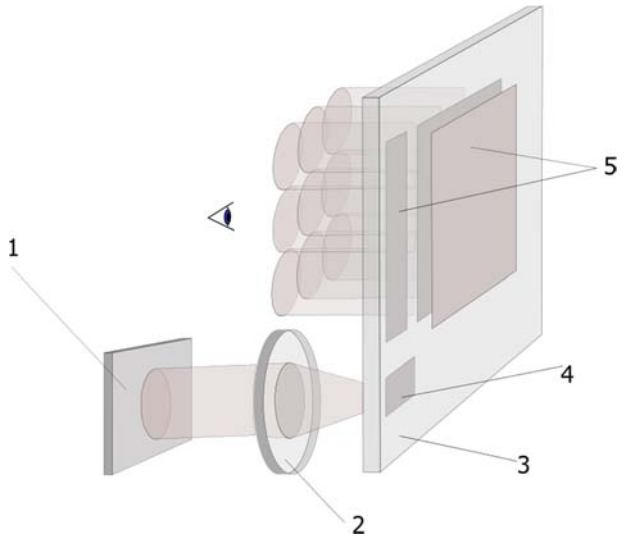
[1] Eisen L. Planar configuration for image projection / L. Eisen, M. Meyklyar, M. Golub, A. Friesem, I. Gurwich, V. Weiss // Applied Optics. — 2006. — Vol. 45. — P. 4005–4011.
[2] Cameron A. Optical Waveguide Technology & Its Application In Head Mounted Displays // Proceedings of SPIE. — 2012. — Vol. 8383. — P. 83830E.
[3] Одиноков С.Б. Оптическая схема получения голографического индикатора для отображения знаково-символьной информации / С.Б. Одиноков, 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.
[4] Solomashenko A.B. Design and experiments of combined diffractive optical element for virtual display and indicators / A.B. Solomashenko, S.B. Odinokov, A.Yu. Zherdev, M.A. Ruchkina, G.R. Sagatelyan // SPIE Proc. — 2015. — Vol. 9508. — P. 95080R.

[5] Odinokov S.B. Combined holographic optical elements for multicolor holographic screens and indicators / S.B. Odinokov, A.S. Kuznetsov, V.V. Kolyuchkin, E.A. Drozdova, A.B. Solomashenko // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — 584 (1).

Combined diffractive optical elements for optical devices and systems display the virtual reality

Ya.A. Grad, S.B. Odinokov, A.B. Solomashenko
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The indicator is a fiber with a combined DOE, coated with a surface diffractive optical elements and reflective volume hologram illuminator (OLED-display) and collimating system, as shown Fig. 1.



1 — OLED-display, 2 — collimating lens, 3 — substrate, 4 — gratings, 5 — volume reflecting grating
Fig. 1. Display schema

Driving indicator for optical display devices.

The distinguishing feature of this system, as mentioned above, is to use a combined structure DOE diffraction gratings consisting of for input and output radiation from the fiber. Volume reflection grating to reduce spectral smearing of the displayed image.

C2.11 Модель дифракции излучения на дифракционной решётке в произвольной системе координат для анализа погрешностей расположения элементов оптических систем

А.Ю. Жердев, С.Б. Одиноков, Д.С. Лушников, В.Е. Талалаев, М.В. Шишова
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Для анализа погрешности установки дифракционных решёток друг относительно друга (в частности для расчёта допуска на углы поворота дифракционной решётки в фронтальной и в горизонтальной плоскостях) необходима модель дифракции излучения в произвольной системе координат.

Рассматривается дифракция излучения в скалярном приближении на пропускающей и отражательной дифракционной решётке без подложки в воздухе.

Модель разработана для быстрой оценки влияния погрешностей расположения элементов датчика на выходной сигнал в системах, в которых энергетический расчёт имеет второстепенное значение по сравнению с расчётом хода лучей.

Входными данными модели дифракции в произвольной системе координат являются волновой вектор $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ падающего излучения, вектор нормали $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ к дифракционной решётке и вектор пространственной частоты $\vec{\nu} = (\nu_x, \nu_y, \nu_z)$ дифракционной решётки, а также направление d дифрагировавшего излучения: проходящее $d = 1$ или отражённое $d = -1$ (на самом деле сонаправленное или противонаправленное вектору решётки), — и порядок дифракции q. Выходными данными является вектор дифрагировавшего излучения $\vec{k}' = (k'_x, k'_y, k'_z)$. Величина волнового вектора определяется длиной волны излучения $|\vec{k}'| = |\vec{k}| = \frac{1}{\lambda}$, а направление вектора есть направление распространения излучения.

Дифракция на решётке приводит к тому, что проекция волнового вектора на вектор решётки изменяется на величину $q\nu$, кратную пространственной частоте решётки $\frac{\vec{k}' \cdot \vec{\nu}}{|\vec{\nu}|} = \frac{\vec{k} \cdot \vec{\nu}}{|\vec{\nu}|} + q|\vec{\nu}|$. При этом проекция волнового вектора на прямую, параллельную штрихам дифракционной решётки не меняется $\vec{k}' \cdot \vec{s} = \vec{k} \cdot \vec{s}$. Вектор штриха $\vec{s}$ можно определить через векторное произведение векторов нормали $\vec{n}$ и частоты $\vec{\nu}$ решётки $\vec{s} = \frac{\vec{n} \times \vec{\nu}}{|\vec{\nu}|}$.

Получили систему уравнений, описывающую дифракцию излучения на решётке в произвольной системе координат.

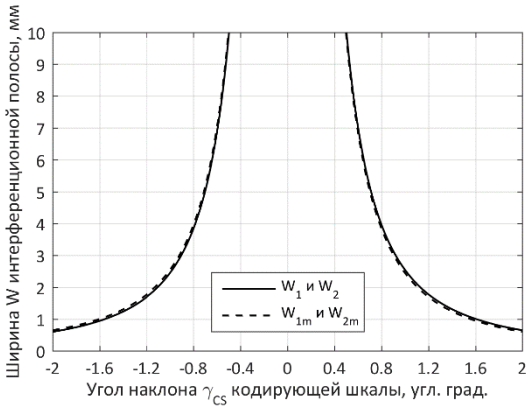
$$\begin{cases} \frac{\vec{k}' \cdot \vec{\nu}}{|\vec{\nu}|} = \frac{\vec{k} \cdot \vec{\nu}}{|\vec{\nu}|} + q|\vec{\nu}|, \\ \vec{k}' \cdot \frac{\vec{n} \times \vec{\nu}}{|\vec{\nu}|} = \vec{k} \cdot \frac{\vec{n} \times \vec{\nu}}{|\vec{\nu}|}, \\ |\vec{k}'| = |\vec{k}|. \end{cases}$$

Решением системы будет выражение

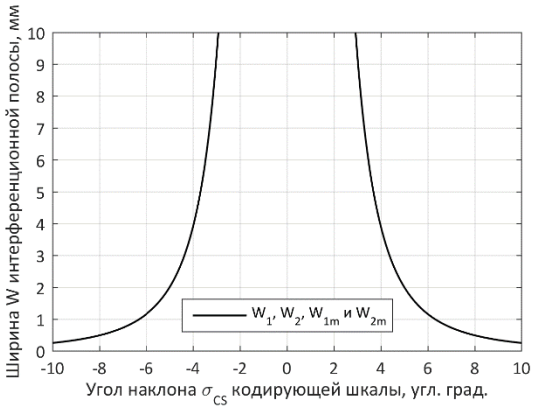
$$\vec{k}' = \left(T^2\vec{k}\cdot\vec{\nu}+q\right)\vec{\nu}+T^2\left(\vec{k}\cdot\vec{n}\times\vec{\nu}\right)\vec{n}\times\vec{\nu}+d\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}-\left(T\vec{k}\cdot\vec{\nu}+\frac{q}{T}\right)^2-\left(T\vec{k}\cdot\vec{n}\times\vec{\nu}\right)^2}\,\vec{n}.$$

Оператор $\vec{k}' = \mathrm{k}\left(\vec{k},\vec{n},\vec{\nu},d,q\right)$, полученный путём решения векторной системы позволяет получить волновой вектор $\vec{k}'$ дифрагировавшего в $(d,\,q)$-м порядке излучения по заданным конфигурациям падающего излучения и дифракционной решётки: волновому вектору $\vec{k}$, вектору нормали $\vec{n}$ к решётке и вектору пространственной частоты $\vec{\nu}$ решётки.

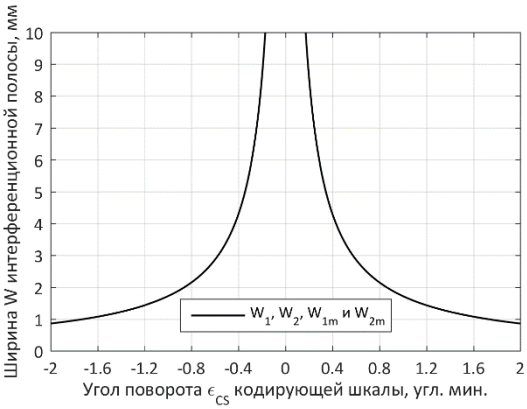
Разработанная модель позволяет рассчитывать погрешности установки элементов в оптических системах, основанных на дифракционных решётках, например, в датчиках измерения линейного и углового перемещения интерференционным методом.



а) от угла наклона кодирующей шкалы в плоскости оптической схемы



б) от угла наклона кодирующей шкалы в плоскости, перпендикулярной оптической схеме



в) от угла поворота кодирующей шкалы вокруг собственной оси

Рис. 1. Графики зависимости ширины бесконечной интерференционной полосы от углов наклона кодирующей шкалы в различных плоскости

Исходя из требования широкой бесконечной интерференционной полосы $W > 10$ мм в датчике линейного перемещения, можно определить допуски на углы расположения кодирующей шкалы: наклон $\gamma < 30'$, наклон $\sigma < 3^\circ$ и поворот $\varepsilon < 12''$.

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

Model of diffraction of radiation on grating in arbitrary coordinate system for element's displacement analysis in optical systems

A.Y. Zherdev, S.B. Odinokov, D.S. Lushnikov, V.E. Talalaev, M.V. Shishova
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The mathematical modelling of diffraction of radiation on grating in arbitrary coordinate system required for diffraction gratings' displacement analysis (for example for calculation of rotation angle tolerance in frontal and horizontal planes). The diffraction of radiation in scalar approximation on transmissive and reflective gratings in the air in arbitrary incidence is considered. Mathematical model is developed for fast calculation of influence of optical elements' displacement on output signal in cases when energy calculation is of secondary importance compared with the ray calculation.

Стендовые доклады
Секция №3

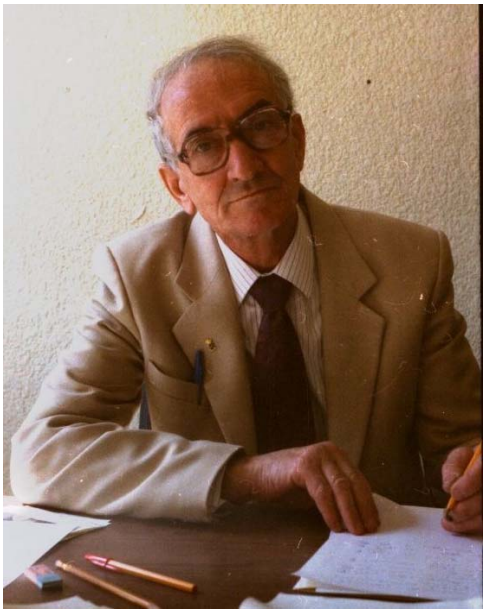
Объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии

Poster presentations
Section №3

С3.1 Юрий Исаевич Островский — основоположник советской школы голографической интерферометрии. К 90-летию со дня рождения

Г.В. Островская[1], И.В. Семенова[1], О.В. Андреева[2]
[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Юрий Исаевич Островский (1926–1992) по праву считается основоположником советской школы голографической интерферометрии. Первые в мире работы по голографической интерферометрии были опубликованы в 1965 г., а первая статья Ю.И. Островского с соавторами вышла в 1966 г. В это время он уже работал в ФТИ им. Иоффе, где и были выполнены в последующем все его исследования в области голографии. Его талант исследователя и глубокое понимание физических процессов обеспечили применение методов голографии в его работах к широкому кругу различных процессов и явлений.



Среди основных направлений его работ следует отметить голографическую диагностику плазмы и исследование токовых слоев; применение методов стробоголографии к исследованию импульсных и газоразрядных ламп, изучение лазерной искры с использованием методов киноголографии. Им были развиты методы резонансной и дисперсионной интерферометрии, динамической голографии. Проведены исследования обращения волнового фронта пикосекундных импульсов при четырехволновом взаимодействии в ниобате лития. Существенная часть его обширного научного наследия посвящена исследованию гидродинамических процессов в конденсированных средах, в том числе кавитационных процессов, инициируемых лазерным излучением, ударных волн в жидкости и на границах раздела жидкости и твердого тела, нелинейных уединенных волн (солитонов) деформации в твердотельных волноводах. Им разработаны голографические методы исследования рельефа поверхностей, методики голографической виброметрии, корреляционной голографической и спекл-интерферометрии. В каждом из этих направлений им были выполнены пионерские

работы, ставшие основой многих ныне широко используемых во всем мире методов голографической интерферометрии.

Ю.И. Островским было опубликовано более 250 научных статей, несколько монографий (в том числе [1–5]), которые переведены на многие иностранные языки. Под его редакцией были изданы на русском языке классические монографии Ч. Веста; Р. Кольера, К. Беркхарта, Л. Лина; М. Франсона [6–8]. Им было получено более 20 авторских свидетельств на изобретения. Более детально о научном наследии и пути в науке Ю.И. Островского можно узнать из опубликованных к его 90-летию работ Г.В. Островской [9, 10].

С 1997 года под эгидой Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе и Банка «Россия» проводится ежегодный конкурс работ в области оптической голографии и интерферометрии на присуждение премии имени Ю.И. Островского. За время существования конкурса на рассмотрение конкурсной комиссии было представлено около 150 работ, были премированы 40 работ авторов, представляющих различные научные учреждения России и СНГ. Среди лауреатов конкурса были научные группы из Москвы и Санкт-Петербурга, Минска, Киева, Казани, Харькова, Иркутска, Новосибирска, Калининграда и т.д. В 2016 г. был проведен юбилейный, 20-й конкурс, а также Всероссийский семинар по оптической голографии и интерферометрии, посвященный 90-летию со дня рождения Ю.И. Островского.

Информация о конкурсе размещена на сайте конкурса по адресу: www.ostrovsky-award.ru. Дополнительную информацию можно получить у ученого секретаря конкурса И.В. Семеновой по электронной почте: irina.semenova@mail.ioffe.ru.

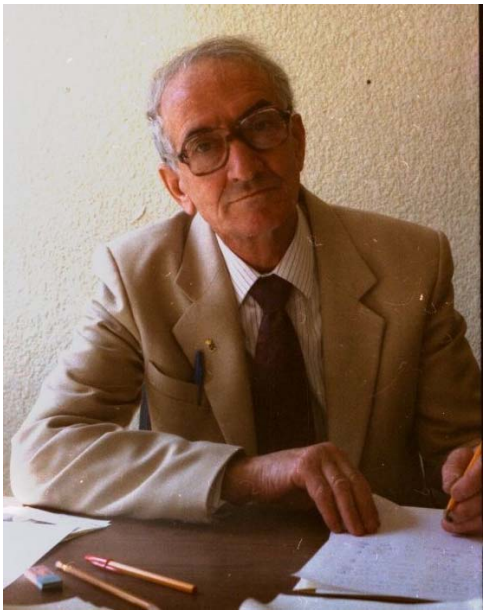
Источники

[1] Островский Ю.И. Голография. — Л.: Наука, 1970.
[2] Зайдель А.Н. Техника и практика спектроскопии / А.Н. Зайдель, Г.В. Островская, Ю.И. Островский. — М.: Наука, 1972.
[3] Островский Ю.И. Голография и ее применение. — Л.: Наука, 1973.
[4] Островский Ю.И. Голографическая интерферометрия / Ю.И. Островский, М.М. Бутусов, Г.В. Островская. — М.: Наука, 1977.
[5] Островский Ю.И. Голографические интерференционные методы измерения деформаций / Ю.И. Островский, В.П. Щепинов, В.В. Яковлев. — М.: Наука, 1988.
[6] Кольер Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин; пер. с англ. под ред. Ю.И. Островского. — М.: Мир, 1973.
[7] Вест Ч. Голографическая интерферометрия / пер. с англ. под ред. Ю.И. Островского. — М.: Мир, 1982.
[8] Франсон М. Оптика спеклов / пер. с англ. под ред. Ю.И. Островского. — М.: Мир, 1980.
[9] Островская Г.В. Посвящается памяти моего мужа — Юрия Исаевича Островского. Голографическая интерферометрия физических процессов // ЖТФ. — 2016. — Том 86. — №6. — С. 1–16.
[10] Островская Г.В. Жизнь и наука. К 90-летию со дня рождения Ю.И. Островского. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016.

Yuri I. Ostrovsky, a founder of the Soviet school of holographic interferometry. To his 90th birthday anniversary

G.V. Ostrovskaya[1], I.V. Semenova[1], O.V. Andreewa[2]
[1] Ioffe Institute, Saint Petersburg, Rassia
[2] Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

Yuri I. Ostrovsky (1926–1992) is rightly considered a founder of the Soviet school of holographic interferometry. While the world's first works on holographic interferometry were published in 1965, the first paper by Yu.I. Ostrovsky and co-workers appeared in 1966. At that time he was already working at Ioffe Physical Technical Institute in St. Petersburg where he then performed all his research activities in the field of holography. His splendid talent to research work and deep understanding of physics provided application of holographic techniques to a wide range of processes and phenomena.



Among the major directions of his research it is worth mentioning the development and application of holographic approaches for plasma diagnostics and current sheet research, usage of stroboscopic holography in studies of flash and gas-discharge lamps, research on laser spark by means of cineholography. He was developing techniques of resonance and dispersion interferometry, dynamic holography. He performed research on wavefront reversal of picosecond pulses at 4-wave mixing in $LiNbO_3$. The essential part of his comprehensive scientific heritage is devoted to the research of hydrodynamic processes in condensed matter, in particular laser-induced cavitation, shock waves in liquids and solid-liquid interfaces, nonlinear strain solitary waves in solid waveguides. He developed various techniques for investigations of surface relief, for holographic vibrometry, correlation holographic and speckle interferometry. His activities in each of these areas resulted in pioneering works which became the basics for a variety of holographic techniques and got worldwide applications nowadays.

Yu.I. Ostrovsky authored and co-authored more than 250 scientific papers and several monographs (incl. [1–5]) which were translated to various foreign languages. He was also active as an editor of Russian editions of foreign monographs in the field of optics and holography. In

particular he edited monographs of Ch. West, R. Collier, K. Berkhardt, L.Lin, M. Francon [6–8] which became holography classics. He was also holding over 20 patents. More details on the scientific heritage of Yu.I. Ostrovsky and his way in science are available in the recent monograph and paper by G.V. Ostrovskaya [9, 10].

The competition of works in the field of optical holography and interferometry for the Yu.I. Ostrovsky award is being held annually, starting from 1997, by Ioffe Physical Technical Institute and "Rossiya" bank. More than 150 research works were submitted during the whole time of competition existence, 40 of them have been awarded. The author teams represented research institutions from Moscow and St. Petersburg, Minsk, Kiev, Kazan, Kharkov, Irkutsk, Novosibirsk, Kaliningrad, etc. The XX-th anniversary competition was hold in 2016. As well as the workshop on optical holography and interferometry was organized at Ioffe Institute in St. Petersburg aimed to commemorate the 90-th anniversary of Yu.I. Ostrovsky.

The information on the competition is available at the competition internet site: www.ostrovsky-award.ru and can be obtained from the competition secretary, I.V. Semenova by e-mail to: irina.semenova@mail.ioffe.ru.

References

[1] Ostrovsky Yu.I. Holography. — L.: Science, 1970.
[2] Zaidel A.N. Spectroscopy: Techniques and Practice / A.N. Zaidel, G.V. Ostrovskaya, Yu.I. Ostrovsky. — M.: Science, 1972.
[3] Ostrovsky Yu.I. Holography and its Application. — M.: Mir, 1977.
[4] Ostrovsky Yu.I. Interferometry by Holography / Yu.I. Ostrovsky, M.M. Butusov, G.V. Ostrovskaya // Springer Ser. Opt. Sci., 20. — Springer-Verlag, Berlin, 1980.
[5] Ostrovsky Yu.I. Holographic Interferometry in Experimental Mechanics / Yu.I. Ostrovsky, V.P. Shchepinov, V.V. Yakovlev // Springer Ser. Opt. Sci., 60. — Springer-Verlag, Berlin, 1991.
[6] Collier R.J. Optical Holography / R.J. Collier, C.B. Burckhardt, L.H. Lin; transl. ed. by Yu.I. Ostrovsky. — M.: Mir, 1973.
[7] Vest C.M. Holographic interferometry / transl. ed. Yu.I. Ostrovsky. — M.: Mir, 1982.
[8] Francon M. Laser Speckle and Applications in Optics / transl. ed. Yu.I. Ostrovsky. — M.: Mir, 1980.
[9] Ostrovskaya G.V. Dedicated to the memory of my husband — Yu.I. Ostrovsky. Holographic interferometry of physical processes // Tech. Phys. — 2016. — 61. — 6.
[10] Ostrovskaya G.V. Life and Science. To the 90th birthday anniversary of Yu.I. Ostrovsky. — St. Petersburg, Publishing House of Polytechnic University, 2016 (in Russian).

С3.2 О популяризации голографии в молодёжной среде. Презентация книги А.А. Акилова и М.К. Шевцова «Голография для любознательных»

А.А. Акилов[1], М.К. Шевцов[2]
[1] ООО «Фотосервис», Ярославль, Россия
[2] АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

«За те деньги, которые стоит обычная фотографическая аппаратура хорошего качества, вы фактически приобретете все необходимое для получения ваших собственных голограмм; при этом для голографирования вполне достаточно технических навыков и мастерства фотографа-любителя. Делать голограммы — просто и увлекательно». (М. Уиньон, «Знакомство с голографией»)

Любая научная школа нуждается в подпитке талантливой и образованной молодежью. Именно в молодые годы наиболее эффективно проявляют себя инженеры и ученые, двигая науку и технический прогресс с достаточным ускорением. Но где найти сегодня эту молодежь среди выпускников школ и технических ВУЗов? Интерес к инженерным наукам сегодня недопустимо низок. В современном мире, насыщенном планшетами, цифровыми фотоаппаратами, компьютерами и удивительными программными продуктами, возникло парадоксальное явление XXI века — равнодушие к вопросу: — А как это работает?

Настоящими инженерами и учеными не рождаются! Их воспитывают талантливые педагоги и умные родители! И если сегодня школа отказалась от задач творческого воспитания, то эту функцию могла бы взять на себя высшая школа в виде когда-то имевших большой успех обществ юных физиков, химиков, астрономов и математиков при ведущих университетах страны. Из первых рук, без искажений и неточных толкований, молодежь могла бы получать не только качественные знания, но и опыт успешных практиков в умении решать нестандартные творческие задачи.

Сегодня нужна современная, качественная и ярко изложенная научно-популярная литература, написанная опытными специалистами, которые имеют практику на передовом крае науки и техники. Это в комплексе с другими усилиями может поднять интерес подрастающего поколения к естественно научным знаниям.

Что такое лазер? Чем фотография отличается от голографии? Как у себя дома сделать голограмму? Какая от всего этого польза? На эти и многие другие вопросы юный читатель сможет найти исчерпывающие ответы в книге «Голография для любознательных».

Целью предлагаемого издания является популяризация науки и технического творчества среди школьников и студентов младших курсов на примере голографии.

Не беда, что физика — мудреная наука. Без сложных формул и вычислений авторы вместе с читателями пытаются разобраться в законах волновой оптики и квантовой механики, узнать, как долго и упорно люди шли к пониманию этих явлений. И самое главное, в этих книгах читатель может получить профессиональный совет, как грамотно провести эксперимент, получить положительный результат и даже провести самостоятельное исследование.

В написанных доступным для школьника языком книгах, авторы пытаются решить следующие задачи:

- знакомят юного читателя с историей оптической науки и голографии в частности;
- раскрывают основные принципы законов волновой и квантовой оптики;
- рассказывают о методах получения голограмм и их практическом использовании в повседневной жизни и технике;

- дают исчерпывающие инструкции и советы, как в домашних условиях, практически без затрат, создать почти профессиональную голографическую лабораторию.

В частности, предлагается конструкция голографической установки, изготовленной из универсальных блоков JOKER.

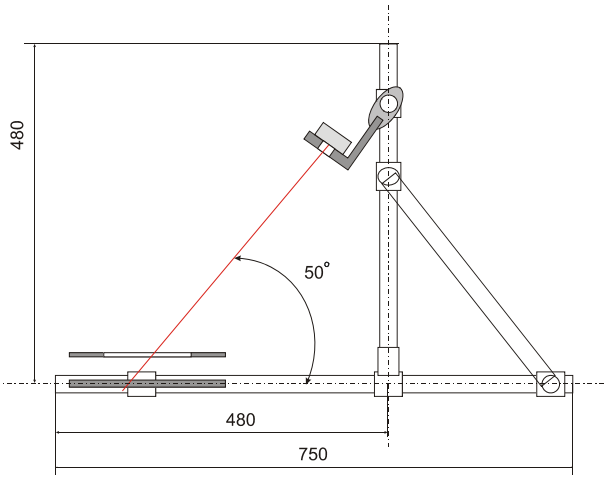


Рис. 1. Компоновка установки

Рис. 2. 3D проект установки

Рис. 3. Предметный столик с держателем фотопластинки

Рис. 4. Серийный блок питания LDD–9A

Рис. 5. Сборка установки

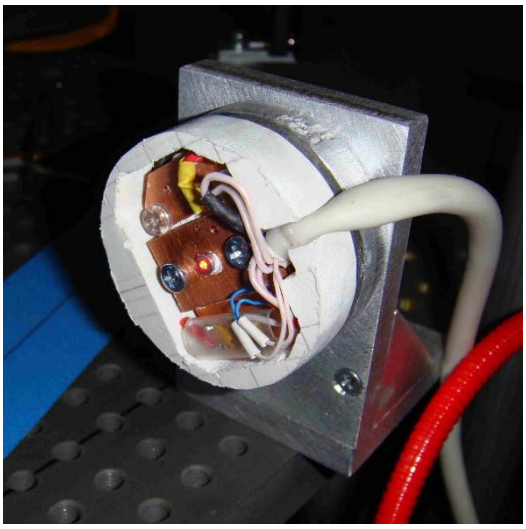


Рис. 6. Конструкция лазерного излучателя

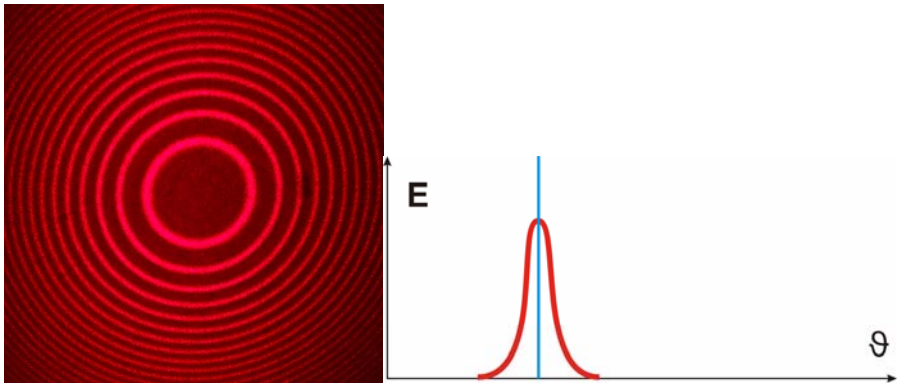


Рис. 7. Лазерный диод устойчиво работает в одночастотном режиме

Технические характеристики прибора:

Габариты установки — 750×480×300 мм
Длина волны излучения лазерного диода HL6385DG — 642 нм.
Мощность излучения лазера — 35 мВт.
Размер фотопластинок ПФГ-03М — 102×127 мм.
Электромеханический затвор — управление +5 В.
Рекомендуется для использования школьной лаборатории голографии.

Источники

[1] Стронг Дж. Практика современной физической лаборатории / Пер. с англ. ОГИЗ. Государственное издательство технико-теоретической литературы. Москва — Ленинград, 1948.
[2] Комар В.Г. Изобразительная голография и голографический кинематограф / В.Г. Комар, О.Б. Серов. — М.: Искусство, 1987.
[3] Унион М. Знакомство с голографией / Пер. с англ. А.Н. Кондрашовой. Под ред. и с предисл. А.И. Ларкина. — М.: Мир, 1980.

On the promotion of holography in the youth environment, Presentation of the book A.A. Akilov and M.K. Shevtsov "Holography for the curious"

A.A. Akilov[1], M.K. Shevtsov[2]
[1] Photoservice ltd., Yaroslavl, Russia
[2] State Optical S.I. Vavilov Institute Ltd., Saint Petersburg, Russia

"For the money, which the usual photographic equipment of good quality costs, you actually can get everything you need to make your own holograms; while for holography is enough technical skill and craftsmanship of an amateur photographer. To make a hologram — easy and fun." (M. Uinon, "Introduction to holography").

Any scientific school needs a recharge of talented and educated youth. But where to find these young people today among high school and technical colleges graduates? Interest in engineering today, is unacceptably low. In a world saturated with i-pads, digital cameras, computers and awesome software products, there was a paradox of the XXI century — indifference to the question: "How does it work?" Today we need a modern, high-quality and clearly set out the scientific and popular literature, written by experienced professionals who have a practice at the forefront of science and technology. This is in conjunction with other efforts can raise the younger generation interested in natural scientific knowledge. What is a laser? What is the difference between photography and holography? How to make a hologram at home? What is the benefit of all this? Answers of these and many other questions the young readers will be able to find in the book "Holography for the curious." The authors try to:

- Introduce young readers to the history of science and optical holography;
- Reveal the basic principles of the laws of wave and quantum optics;
- Describe the methods of recording holograms and their practical use in everyday life and technology;
- Provide comprehensive instructions and advices how to create almost professional holographic laboratory at home with little cost; In particular, the proposed construction of a holographic installation made of universal JOKER blocks.

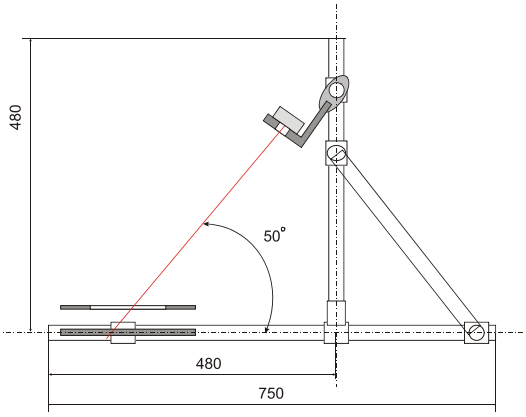


Fig. 1. Holographic set-up

Fig. 2. 3D project

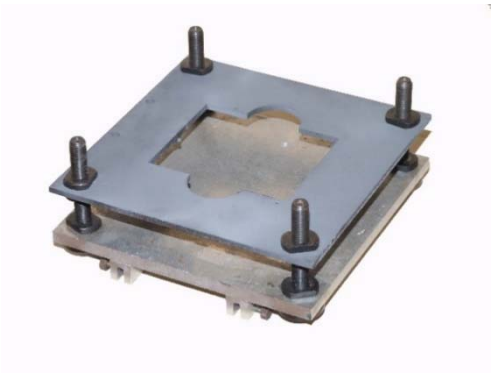


Fig. 3. Plate holder

Fig. 4. Standard power supply LDD-9A

Fig. 5. General view of the holographic set-up

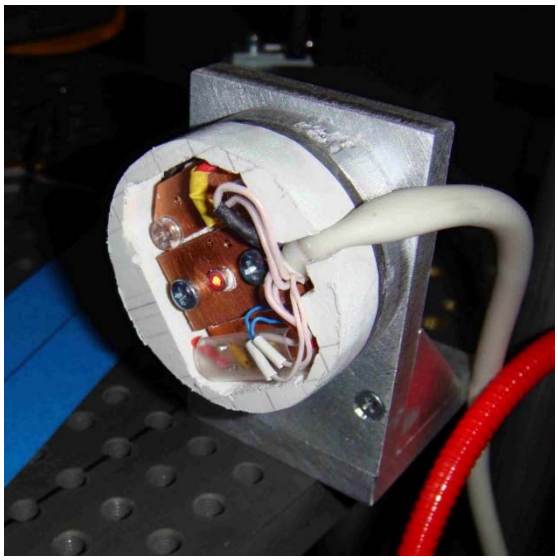


Fig. 6. Construction of the laser emitter

C3.3 Влияние коронного разряда на запись голографических дифракционных решёток в структуре $Cu-As_2Se_3$

А.М. Настас, М.С. Иову, А.М. Присакар
Институт прикладной физики Академии наук, Кишинев, Молдова

Исследовалось влияние коронного разряда на оптическую запись голографических решёток в тонкоплёночных структурах $Cu-As_2Se_3$. Показано, что использование отрицательного коронного разряда приводит к увеличению голографической чувствительности этих структур и увеличению дифракционной эффективности записанных голографических дифракционных решеток. Рельефные дифракционные решётки, сформированные с помощью химического травления дифракционных решёток, записанных в присутствии отрицательного коронного заряда, отличались более высокой глубиной модуляции поверхности. Как следствие достигались более высокие значения дифракционной эффективности рельефных структур по сравнению с оптической записи без коронного разряда. Использование положительного коронного разряда приводило к ослаблению процесса записи голографических решеток в структуре $Cu-As_2Se_3$.

Введение

Тонкопленочные структуры на базе халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) перспективны для формирования рельефных голографических дифракционных оптических элементов, а также для создания микро-наноструктур методами оптической и электронной литографии [1, 2].

Для записи оптического голографического изображения наиболее востребован способ записи за счет фотодиффузия металла (ФДМ) [3]. При ФДМ в структуре металл-ХСП (наблюдается аномально высокая скорость диффузии металлов (Ag, Cu и др.) в освещенные места ХСП с последующим образованием продукта взаимодействия металла и ХСП, который практически не растворяется в щелочах). К его достоинству, следует отнести, прежде всего, высокое разрешение (вплоть до нескольких нанометров [3]), высокие значения отношения сигнал-шум, возможность трансформации изображения за счет травления в рельефно-фазовое и смещение спектрального максимума фоточувствительности за счет состава ХСП (от ультрафиолета до инфракрасного диапазона).

Основными недостатками являются относительно низкая светочувствительность. Частично эту проблему удается решить за счет оптимизации состава пленок ХСП [3]. Отдельно следует выделить способ записи в тонкопленочных структурах металл-ХСП с одновременной их зарядкой в поле коронного разряда. Для увеличения чувствительности, дифракционной эффективности и глубины рельефа использование коронного разряда оказалось целесообразным при записи как за счет фотоструктурных превращений (ФСП) [4, 5], так и ФДМ [6, 7]. В работе [7] было показано, что фоточувствительность структуры $Cu-As_2Se_3$ на порядок выше, чем $Cu-As_2S_3$.

Целью данной работы являлось исследование влияния поля коронного разряда на формирование голографических дифракционных решеток при записи в тонкопленочных структурах $Cu-As_2Se_3$.

Методика получения и исследования образцов

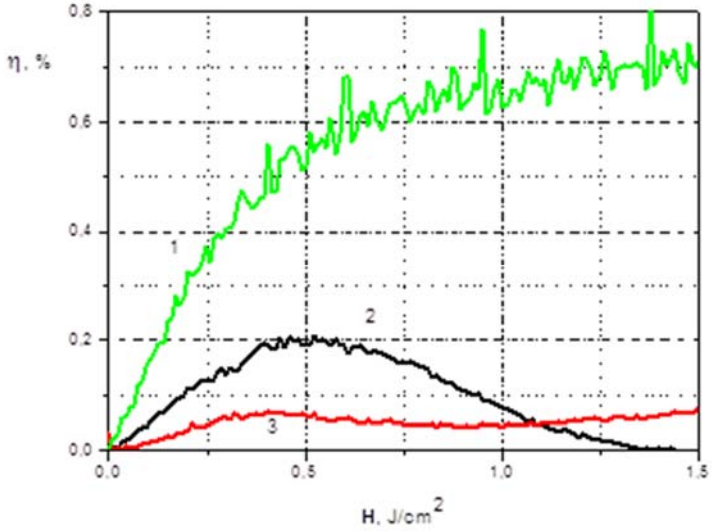
Тонкопленочные образцы $Cu-As_2Se_3$ были полученны методом последовательного термического испарения в вакууме слоёв Cu и ХСП на стеклянную подложку. Толщина

полупроводникового слоя ХСП составляла 0,27 мкм. Толщина металлического слоя Cu, который при записи в поле коронного разряда служил одним из электродов, была равна 40 нм. При такой толщине пропускание меди на длине волны 0,63 мкм составляет около 27%.

Запись голографических дифракционных решеток (ГДР) с пространственной частотой 500 мм$^{-1}$ осуществлялась по стандартной внеосевой схеме, в сходящихся пучках He–Ne лазера ($\lambda = 0{,}6328$ мкм). Экспонирование образцов проводилась со стороны ХСП. Суммарная освещенность в плоскости исследуемых структур $E = 2$ мВт/см^2. Голографическая запись решеток осуществлялась как в поле коронного разряда, так и без него. При этом на коронирующий электрод подавался как положительный, так и отрицательный потенциал ± 7 кВ. Измерение дифракционной эффективности η производилось в первом порядке дифракции в прошедшем свете при его нормальном падении к поверхности слоя ХСП на длине волны $\lambda = 0{,}6328$ мкм. Ее определяли как отношение интенсивности света в первом дифракционном максимуме к интенсивности света прошедшего через неэкспонированный участок используемого образца. Голографическую чувствительность S при $\eta = 0{,}1\%$ мы определяли по формуле предложенной в [8], а именно $S = \sqrt{n}/(HK)$, где $H = Et$ — экспозиция (E — суммарная освещенность, t — время записи), $K = 1$ — видность полос (интенсивность интерферирующих лазерных пучков была одинакова). В исследуемых структурах с толщиной слоя As_2Se_3, равной 0,27 мкм в которых были записаны ГДР обычным способом и в присутствие поля коронного разряда были подвергнуты химическому травлению в водном растворе неорганической щелочи NaOH (1%).

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость η от экспозиции H записи ГДР в структурах Cu–As_2Se_3 с толщиной ХСП 0,27 мкм (кривая 1–3). Для записи использовался He–Ne лазер($\lambda = 0{,}6328$ мкм, $E = 2$ мВт/см^2). Кривые 1, 3 соответствуют записи в электрическом поле коронного разряда различной полярности, кривая 2 — в обычных условиях, без коронного разряда. Из рисунка видно, что приложение электрического поля коронного разряда оказывало заметное влияние на процесс записи дифракционных решёток в тонкопленочной структуре Cu–As_2Se_3. Использование отрицательного коронного разряда (кривая 1), приводило к увеличению дифракционной эффективности по сравнению с обычной записью (кривая 2). Максимальное значение дифракционной эффективности ГДР при проведении процесса экспонирования в поле отрицательного коронного разряда равно примерно 0,7% (кривая 1), без приложения поля — обычная запись 0,2% (кривая 2), а при положительном коронном разряде — 0,07% (кривая 3). Столь не высокие значения η обусловлены использованием относительно тонкого слоя ХСП (0,27 мкм). Тонкие слои ХСП были использованы для исключения (по крайне мере для минимизации) вклада в запись ГДР составляющей за счет ФСП в пленке ХСП. Оцененные значения голографической чувствительности S при $\eta = 0{,}1\%$ составляли 0,45 см^2/Дж и 0,16 см^2/Дж, при использовании отрицательного коронного разряда (кривая 1), и обычной записи (кривая 2), соответственно. В то же время при использовании положительного поля коронного разряда снижались как S, так и максимальное значение дифракционной эффективности (кривая 3).



1 — запись в поле отрицательного коронного разряда при (U = −7 кВ), 2 — обычная запись,
3 — при записи в поле положительного коронного разряда (U = +7 кВ)
Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности от экспозиции (λ = 0,6328 мкм) в структуре $Cu-As_2Se_3$

В табл. 1 приведены значения дифракционной эффективности ГДР полученных при обычной прямой записи и в поле коронного разряда (H = 0,5 Дж/см^2) в структуре $Cu-As_2Se_3$ (толщина ХСП 0,27 мкм), а так же для рельефно-фазовых дифракционных решёток полученных в результате травления.

Табл. 1. Дифракционная эффективность записанных и протравленных ГДР

U, кВ	$\eta_{запись}$, %	$\eta_{травление}$, %
0	0,2	4
−7	0,5	10
+7	0,07	2,5

Тестовое травление (без оптимизации состава, PH раствора и температуры) этих ГДР, сформированных в $Cu-As_2Se_3$ осуществлялось в водном 1% растворе неорганической щелочи NaOH. Процесс травления привел к значению η решетки записанной в поле отрицательного коронного разряда η = 10%, без поля η = 4%, а для решётки, полученной при использовании положительного коронного разряда η = 2,5 %.

Таким образом, использование отрицательного коронного разряда при записи ГДР в структуре $Cu-As_2Se_3$ позволяет после их травления получать рельефно-фазовые ГДР с дифракционной эффективностью выше в 2,5 раза, чем у подобных протравленных ГДР при записи, которых коронный разряд не использовался, т.е. при обычной записи.

Полученные результаты при записи за счет ФДМ в структуре $Cu-As_2Se_3$ могут быть качественно объяснены в рамках, существующей фотоэлектрической модели [3, 9], в которой учитываются процессы, происходящие на фотоактивных границах раздела. Эта модель наиболее хорошо описывает основные феноменологические характеристики явления фотостимулированной диффузии металла в стркуктурах металл — ХСП. Согласно этой модели скорость процесса фотодиффузии ограничивается скоростью проникновения металла из легированной области ХСП в нелегированную. При освещении светом этой границы происходит разделение электронов и дырок таким образом, что они создают тянущее электрическое поле для ионов металла [9]. Очевидно, что при подключении этой структуры к

коронному разряду это тянущее электрическое поле, которое заставляет перемещаться положительные ионы металла из фотолегированного слоя в нелегированный слой [3, 9] будет либо увеличиваться, либо уменьшаться в зависимости от полярности на коронирующем электроде.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что использование отрицательного коронного разряда приводит к увеличению голографической чувствительности структур $Cu-As_2Se_3$ и, соответственно, к относительному увеличению дифракционную эффективность записанных голографических дифракционных решеток. Рельефные дифракционные решётки, сформированные с помощью химического травления дифракционных решёток, записанных в присутствии отрицательного коронного заряда, отличались лучшей однородностью рельефа и более высокой глубиной модуляции поверхности. Использование положительного коронного разряда приводит к ослаблению процесса записи голографических решеток в структуре $Cu-As_2Se_3$.

Источники

[1] Neilson J.R. Fabrication of nano-gratings in arsenic sulphide films / J.R. Neilson, A. Kovalskiy, M. Vlcek, H. Jain, F. Miller // Journal of Non-Crystalline Solids. — 2007. — 353. — P. 1427–1430.
[2] Sergeev S.A. Relief crossed diffraction gratings formed by e-beam recording in As_2S_3 films / S.A. Sergeev, M.S. Iovu // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. — 2012. — Vol. 7. — P. 740–743.
[3] Венгер Е.Ф. Фотостимулированые процессы в Халькогенидных стеклообразных полупроводниках и их практическое применение / Е.Ф. Венгер, А.В. Мельничук, А.В. Стронский. — Киев: Академпериодика, 2007. — 283 с.
[4] Nastas A.M. Charging of Glassy Chalcogenide Semiconductors in Corona Discharge and Its Effect on Holographic Grating Formation / A.M. Nastas, A.M. Andriesh, V.V. Bivol, A.M. Prisakar, G.M. Tridukh // Technical Physics, 2009. — Vol. 54. — №2. — P. 305–308.
[5] Bodurov I. Diffraction efficiency growth of nano-scale holographic recording produced in a corona discharge / I. Bodurov, T. Yovcheva, I. Vlaeva, A. Viraneva, R. Todorov1, G. Spassov, S. Sainov // Journal of Physics: Conference Series. — 2012. — 398. — 012053.
[6] Настас А.М. Исследование влияния коронного разряда на запись голографических дифракционных решеток в структуре $Cu-As_2S_3$ / А.М. Настас, М.С. Иову, А.М. Присакар // ПЖТФ. — 2014. — Том 40. — №9. — С. 80-85.
[7] Nastas A.M. Influence of corona discharge on holographic recording of diffraction gratings in Cu–chalcogenide film structures / A.M. Nastas, M.S. Iovu, A.M. Prisacar, A.Yu. Meshalkin, S.A. Sergeev // Journal of Non-Crystalline Solids. — 2016. — Vol. 438. — P. 7–9.
[8] Кольер Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. — М.: Мир, 1973. — С. 698.
[9] Stetsun A.I. Main features of photostimulated ion transport in heterojunctions based on mixed ion-electron (hole) conductors and the model of a thin-film ion accelerator / A.I. Stetsun, L.A. Dvorina // Smiconductors. — 2011. — Vol. 45. — No. 10. — P. 1291–1296.

Influence of corona discharge on the recording of holographic diffractive gratings in Cu–As_2Se_3 structures

A.M. Nastas, M.S. Iovu, A.M. Prisacar
Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences, Chisinau, Moldova

The influence of corona discharge on optical recording of holographic gratings in Cu–As_2Se_3 thin film structures have been investigated. It was shown that applying of negative corona discharge lead to increasing of holographic sensibility and of the diffraction efficiency of the recorded holographic diffractive gratings in these structures. The relief diffractive gratings, formed using the chemical etching of holographic diffractive gratings, recorded in the presence of the negative corona discharge were remarkable by more high depth of surface moulation. In result of this operation, for the relief structures was reached more higher values of the diffraction efficiency comparatively those obtained without corona disarge. Applying of positive corona discharge conduct to weakness of the recording process of the holographic gratings in the structure Cu–As_2Se_3.

Introduction

It is well known the recording method in thin film structures Metal-Chalcogenide Glass Semiconductor (ChGS) at simultaneously applied a corona discharge [1, 3]. In order to increase the sensibility, diffraction efficiency and the depth of the relief, utilization the corona discharge has very efficient for the recording process both in the case of photo-structural transformations (PhST) [1, 2], as well as in the case of photo-diffusion of the metal (PhDM) [3, 4]. In the paper [4] it was demonstrated that the photosensitivity of Cu–As_2Se_3 thin film structure is of one order higher than for Cu–As_2S_3 structure.

The goal of the present work is to investigate the influence of the corona discharge on the formation of holographic diffraction gratings recorded in Cu–As_2Se_3 thin film structures.

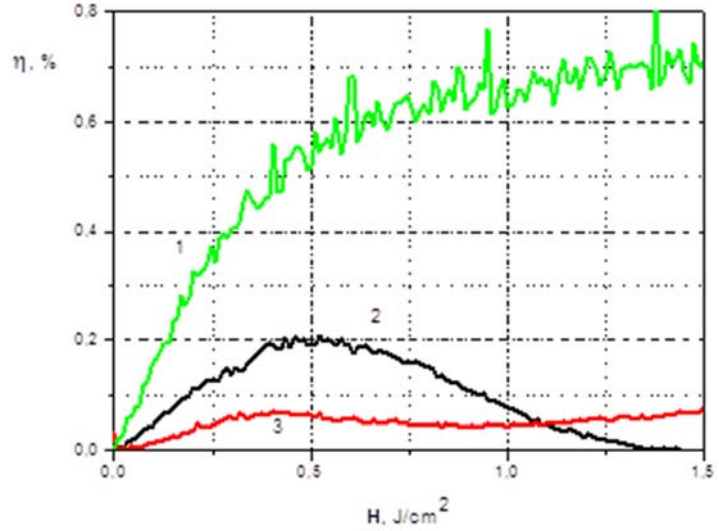
Methodology of preparation and investigation of samples

The Cu–As_2Se_3 thin film samples were prepared sequentially thermal deposition in vacuum on the glass substrate of Cu and ChGS layers. The thickness of the ChGS film was $L = 0.27$ μm. The thickness of the metallic Cu layer, which during the recording process exhibit the role of electrode was of 40 nm.

The recording of holographic diffraction gratings (HDG) withy the spatial frequency $\nu = 500$ mm^{-1} were performed by the converging of the He–Ne laser beams ($\lambda = 0.6328$ μm). The diffraction gratings were recorded in the field of corona discharge, as well as without corona. To the corona electrode was applied both the positive and negative voltage $U = 7$ kV. The HDG were chemical etched in the water solution of inorganic alkali NaOH (1%).

Experimental results and discussion

From the Fig. 1 it is evident, that applying the negative corona discharge (curve 1) conduct to increasing of the diffraction efficiency η in comparison with the usual recording (curve 2). The holographic sensibility S at $\eta = 0.1\%$ takes the values $S = 0.45$ cm^2/J and S = 0.16 cm^2/J, when the negative corona discharge is applying (curve 1), and without corona (curve 2), respectively. At the same time when the positive corona discharge is applying, the sensibility S as well as the maximum value of η (curve 3) decreased.



Curve 1 — recording in the field of negative corona discharge ($U = -7$ kV), curve 2 — without corona, and curve 3 — recording in the field of positive corona discharge ($U = +7$ kV)
Fig. 1 Dependence of diffraction efficiency on exposure ($\lambda = 0.6328$ μm) in Cu—As_2Se_3 thin film structure

In the Table 1 are presented the values η of the HDG obtained for the case of usually direct recording and in the field of corona discharge ($H = 0{,}5$ J/cm^2) for the Cu—As_2Se_3 structure (thickness for ChGS $L = 0{,}27$ μm), as well as for the relief-phase diffraction gratings formed in result of etching.

Table 1. The diffraction efficiency of the recorded and etched holographic diffraction gratings (HDG)

U, kV	$\eta_{recorded}$, %	$\eta_{etching}$, %
0	0.2	4
−7	0.5	10
+7	0.07	2.5

The etching process leads to the values of gratings η recorded in the field of negative corona discharge $\eta = 10\%$, without corona $\eta = 4\%$, and for the grating obtained in the positive corona discharge $\eta = 2.5\%$.

The obtained results can be qualitative interpreted in framework of the existing photoelectric model [5, 6] which take into account the processes on the photoactive interfaces. According to this model, the velocity of the photo-diffused process is limited by the penetration velocity of the metal from doped region of ChGS into non-doped region. During the light exposure of this interface take place the division of the electrons and holes in such way, creating drawing electrical field for the metallic ions [6]. It is evident, that when the corona discharge is applied to the investigated structure, this drawing electrical field enforce the positive ions of the metal to move from the photo-doped layer into non-doped lyer [5, 6], and this process may increase/ or decrease in dependence of the polarity on the corona electrode.

Summary

It was established that applying of negative corona discharge during the recording process of the HDG leads to increasing of the holographic sensitivity of the Cu—As_2Se_3 structure, and respectively, to relative increasing of the diffraction sensibility of the recorded HDG. The relief

diffraction gratings, formed using the chemical etching of HDG recorded in the presence of negative corona discharge, are characterized by better uniformity of the relief and by more higher depth of the surface modulation. Applying of the positive corona discharge leads to attenuation of the recording process of the holographic gratings in $Cu-As_2Se_3$ structure.

References

[1] Nastas A.M. Charging of Glassy Chalcogenide Semiconductors in Corona Discharge and Its Effect on Holographic Grating Formation / A.M. Nastas, A.M. Andriesh, V.V. Bivol, A.M. Prisakar, G.M. Tridukh // Technical Physics, 2009. — Vol. 54. — №2. — P. 305–308.

[2] Bodurov I. Diffraction efficiency growth of nano-scale holographic recording produced in a corona discharge / I. Bodurov, T. Yovcheva, I. Vlaeva, A. Viraneva, R. Todorov1, G. Spassov, S. Sainov // Journal of Physics: Conference Series. — 2012. — 398. — 012053.

[3] Nastas A.M. A Study of the Effect of a Corona Discharge on Recording of Holographic Diffraction Gratings in the $Cu-As_2S_3$ Structure / A.M. Nastas, M.S. Iovu, A.M. Prisakar // Technical Physics Letters. — 2014. — Vol. 40. — №5. — P. 401–403.

[4] Nastas A.M. Influence of corona discharge on holographic recording of diffraction gratings in Cu–chalcogenide film structures / A.M. Nastas, M.S. Iovu, A.M. Prisacar, A.Yu. Meshalkin, S.A. Sergeev // Journal of Non-Crystalline Solids. — 2016. — Vol. 438. — P. 7–9.

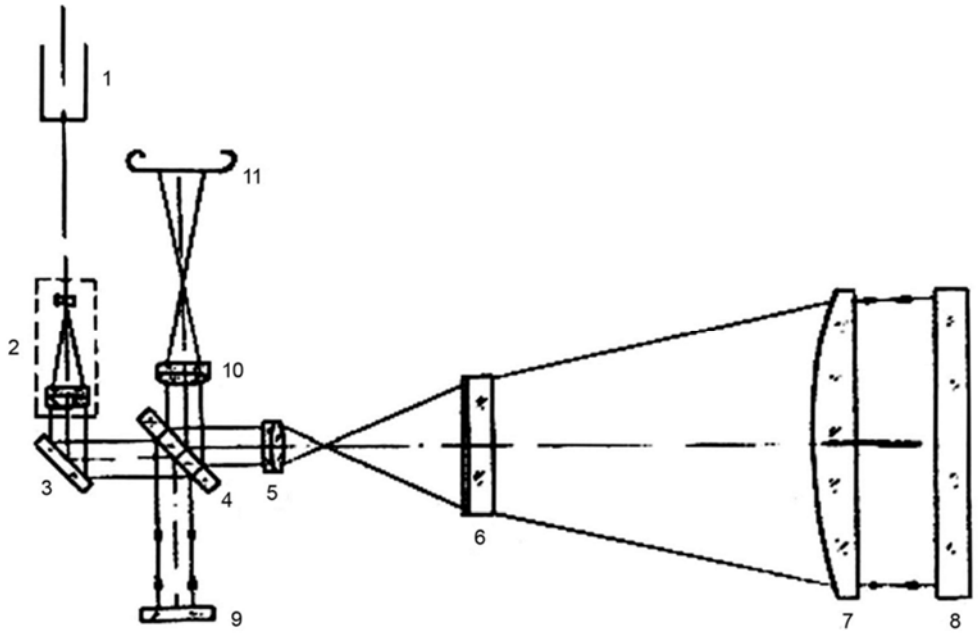
[5] Venger E.F. Photostimulated processes in vitreous chalcogenide semiconductors and its practical applications / E.F. Venger, A.V. Melyniciuc, A.V. Stronskii. — Kiev: Academperiodica. — 2007. — 283 p. (in Russian).

[6] Stetsun A.I. Main features of photostimulated ion transport in heterojunctions based on mixed ion-electron (hole) conductors and the model of a thin-film ion accelerator / A.I. Stetsun, L.A. Dvorina // Smiconductors. — 2011. — Vol. 45. — No. 10. — P. 1291–1296.

С3.4 Методы и аппаратура с большими полями визуализации на основе использования осевых синтезированных голограмм для оснащения газодинамических и баллистических установок и комплексов (Памяти А.Ф. Белозёрова и Л.Т. Мустафиной)

А.В. Лукин
АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

С созданием в 1957 году в г. Казани филиала Государственного оптического института (позднее — Государственный институт прикладной оптики) тематика теневых и интерференционных приборов из Ленинграда постепенно передавалась в Казань, и в 1966 году головная роль по научно-техническому направлению «Приборы для исследования неоднородностей в прозрачных средах» была закреплена за ГИПО. Приказом Министра оборонной промышленности СССР №414 от 18.12.1981 года научным руководителем этого направления был назначен Альберт Фёдорович Белозёров. А.Ф. Белозёров приобрел большой опыт научной, организаторской и педагогической деятельности. Он принимал активное участие в разработке оптико-физической аппаратуры новых поколений для оснащения уникальных отечественных аэродинамических установок и баллистических трасс (ЦНИИ Маш, ЦАГИ, ИВТ АН, ВВИА им. Н.Н. Жуковского, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, НИИ ПММ при Томском государственном университете). Особое место в этом направлении занимает разработка методов и исследовательской аппаратуры с большими полями визуализации на основе использования осевых синтезированных голограмм в качестве оптических компенсаторов [1].



1 — лазер; 2 — расширитель; 3, 9 — плоские зеркала; 4 — светоделитель;5, 10 — объективы;
6 — осевая синтезированная голограмма в качестве оптического компенсатора (∅200 мм);
7 — плоско-выпуклая линза (стекло К8, фокусное расстояние f = 1506,6 мм, ∅820 мм);
8 — плоское зеркало; 11 — фотокамера
Рис. 1

Выдающиеся результаты здесь были достигнуты в 1970–80-х годах группой «голографистов» ГИПО во главе с оптиком-экспериментатором Людмилой Таировной Мустафиной [2]. Особо следует отметить ее роль в организации на КОМЗе серийного выпуска интерференционно-теневых приборов серии ИАБ [3], которыми предполагалось оснащать создававшиеся в то время новые газодинамические и аэробаллистические установки и комплексы.

В качестве примера ниже представлена принципиальная оптическая схема интерферометра Тваймана — Грина с полем визуализации ∅800 мм (рис. 1) и интерферограмма (рис. 2), характеризующая его оптическое качество. Здесь был использован синтезированный голограммный компенсатор ∅200 мм.

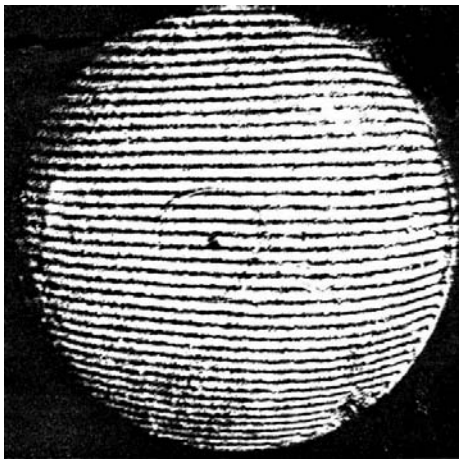


Рис. 2. Интерферограмма, характеризующая качество формирующей оптики интерферометра (λ = 632,8 нм)

В докладе представлены различные варианты схемных решений интерференционно-теневой аппаратуры на основе использования осевых синтезированных голограмм и примеры их практической реализации, выполненные в 1970–90-х годах в ГИПО, на заинтересованных предприятиях отрасли, а также в ряде академических организаций и ВУЗах.

Источники

[1] Белозёров А.Ф. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Часть II / А.Ф. Белозёров, Н.П. Ларионов, А.В. Лукин, А.Н. Мельников // Фотоника. — 2014. — №5. — С. 30–41.

[2] Мустафина Л.Т. Исследование и разработка голограммных методов и систем для изучения газовых потоков низкой плотности: дисс. ... канд. техн.наук / ЛГУ — Л., 1983. (Научный руководитель А.Ф. Белозёров).

[3] Белозёров А.Ф. Виброустойчивый интерференционно-теневой прибор на основе синтезированных голограммных линз для исследования газодинамических течений / А.Ф. Белозёров, А.Л. Захаров, А.В. Лукин, Л.Т. Мустафина // Применение оптической голографии для неразрушающего контроля и измерений. — Л.: ЛДНТП, 1984. — С. 46–49.

In memory of A.F. Belozerova and L.T. Mustafinoy — Methods and equipment with large fields of visualization through the use of axial synthesized holograms for equipping the gas-dynamic and ballistic facilities and complexes

A.V. Lukin
JSC "NPO "State Institute of Applied Optics", Kazan, Russia

The report presents various options for circuit design interference-shadow apparatus based on the use of axial synthesized holograms and examples of their practical implementation, the group made Mustafina LT in 1970—90-ies in GIPO on relevant industry enterprises, as well as in a number of academic organizations and universities.

Стендовые доклады
Секция №4

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

Poster presentations
Section №4

С4.1 Оптимизация технологического процесса производства дифракционных решеток-поляризаторов инфракрасного излучения

П.Ю. Демеев
АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

Дифракционные решетки-поляризаторы относятся к поляризационным приборам для получения и исследования линейно-поляризованного света и представляют собой регулярную структуру из линейных проводников. Поляризационные свойства решеток-поляризаторов определяются природой взаимодействия электромагнитного излучения с решетками.

Сферы применения [1]:

- исследование деформации материалов под напряжением;
- исследование ориентации молекул кристаллических и полимерных пленок;
- изображающая оптика;
- сенсоры и детекторы;
- спектральные приборы.

Один из основных параметров оценки поляризационных характеристик линейных поляризаторов — поляризующая способность. P — степень поляризации, создаваемая поляризатором в том случае, когда падающий луч не поляризован. Если луч, падающий на поляризатор, уже частично поляризован, то степень поляризации выходящего луча будет отличаться от поляризующей способности, и это должно учитываться при их проверке [2].

Производимые АО «НПО «ГИПО» инфракрасные решетки-поляризаторы из полиэтилена предназначены для линейной поляризации света в режиме пропускания в спектральном диапазоне от 7 мкм до миллиметровых длин волн (гарантированно до 100 мкм). Решетки-поляризаторы производятся методом копирования с оригинальных нарезных дифракционных решеток (НДР). Частоту штрихов, их глубину и размеры рабочей апертуры можно регулировать, изготавливая соответствующую решетку. В качестве материала подложки решеток-поляризаторов для ближней ИК области обычно используется фторопласт, а для дальней ИК области — полиэтилен. Наиболее востребованными в настоящее время являются решетки-поляризаторы на полиэтиленовой основе. После получения пленки поляризатора на поверхность пленки со штрихами наносится слой металла, причем он покрывает лишь одну грань треугольного профиля. Такие решетки-поляризаторы обладают высокой поляризующей способностью при $\lambda > 3d$, где λ — длина волны, d — период между штрихами. В этих условиях спектральные порядки отсутствуют, и решетка действует как фильтр, пропускающий излучение с электрическим вектором напряженности, перпендикулярным штрихам, а излучение с электрическим вектором, параллельным штрихам, почти полностью отражается. В первом случае решетка будет себя вести как диэлектрик, во втором — как проводник [3].

Решетки-поляризаторы на полиэтиленовой основе способны пропускать лишь определенный интервал длин волн в ИК области. Эти границы удается сдвинуть в коротковолновую сторону, применяя более глубокие штрихи и соответственно увеличивая угол напыления металла.

При изготовлении решеток-поляризаторов производится подбор технологических параметров копирования для каждой НДР в зависимости от ее апертуры и количества штрихов на 1 мм. Ниже представлена табл. 1, в которой приведены экспериментально подобранные оптимальные параметры процесса копирования. Получаемые решетки-поляризаторы имеют характеристики, представленные в табл. 2.

Табл. 1. Технологические параметры процесса копирования

Апертура, мм	Температура, С°	Время, ч	Давление, кгс/см²
50×50	110–115	1–3	1,2–1,4
70×70	110–115	2,5–4	1,3–1,5
90×90	110–115	3,5–5	1,4–1,6

Табл. 2. Основные измерительные показатели поляризаторов

Материал подложки	Полиэтилен
Спектральный диапазон, мкм	≥7
Стандартная апертура, мм	15 или 40
Размер оправы для стандартной апертуры, мм	∅50×8 или ∅25×8
Макс. апертура, мм	100
Кол-во штрихов на мм	До 1200
Эффективный коэффициент пропускания K_1	70–80%
Пропускание нежелательной поляризации K_2	<1% на 8 мкм <0,1% на 30–100 мкм
Степень поляризации $(K_1 - K_2)/(K_1 + K_2)$	98% на 8 мкм 99,5% на 30–100 мкм

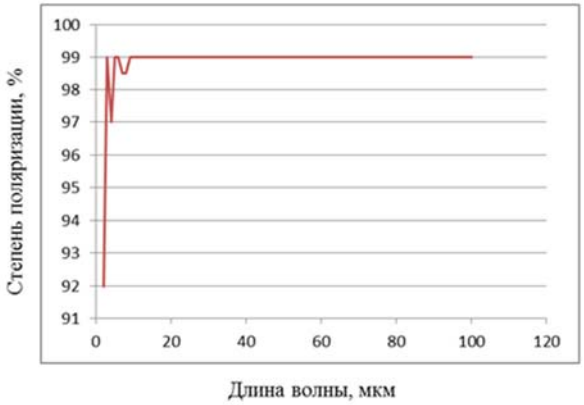


Рис. 1. Степень поляризации ИК-поляризаторов

При изготовлении решеток-поляризаторов встречаются некоторые проблемы, связанные с оборудованием и свойствами материалов подложек. К этим проблемам относятся: пузыри воздуха в толще поляризатора, разнотолщинность решетки-поляризатора и дефекты в виде лучей на его поверхности (из-за напряжения между плитами пресса). Изготовление поляризатора из однослойной пленки труднореализуемо, т.к. она имеет слишком маленькую толщину, и это ведет к таким неудобствам, как сложность при снимании пленки поляризатора с НДР и большая вероятность нарушить профиль штрихов при съеме. Поэтому зачастую используют рукава этой же пленки, что позволяет увеличить ее толщину в два раза, но приводит к возникновению пузырей. Производство «толстых» технических пленок из полиэтилена в нашей стране не развито, а использование бытовой пленки не рассматривается. Освоение производства этих пленок возможно в НПП «Тасма», г. Казань на лабораторной соэкструзионной установке.

Для решения проблем с пузырями воздуха и сохранением оптимальной толщины решетки-поляризатора была изготовлена моно-пленка из полиэтилена толщиной 200 мкм, и в технологический процесс была включена вакуум-камера. На выходе получили решетки-поляризаторы с достаточной толщиной, без каких-либо дефектов при условии, что сам процесс прессования занял всего 60 минут.

Выводы

- В настоящее время АО «НПО «ГИПО» производит решетки-поляризаторы, соответствующие мировому уровню.
- Предложены и реализованы варианты решения технологических проблем при изготовлении решеток-поляризаторов. Продолжительность процесса копирования было сокращена в среднем почти в 3 раза.
- Существенных результатов для оптимизации технологического процесса изготовления решеток-поляризаторов позволит достичь внедрение в производство современного пневматического пресса с вакуум-камерой, а также освоение опытного производства технической пленки на экструзионной линии модели LF-400/COEX с фильерой LPD40-75/7.

Источники

[1] URL: www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_polarizers/.
[2] Лукашевич Я.К. Технология изготовления поляризаторов электромагнитного излучения из линейных проводников на основе нарезных дифракционных решеток: диссертация кандидата технических наук, Казань, 2002. — 160 с.
[3] Герасимов Ф.М. Дифракционные решетки / Ф.М. Герасимов, Э.А. Яковлев // Современные тенденции в технике спектроскопии. — Новосибирск: Наука, 1982.

Production process optimization of infrared radiation diffraction polarizer-gratings

P.Yu. Demyeev
JSC “NPO “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

A polarizer is a device which is intended to generate completely or partially polarized light from natural light, the letter being unpolarized or partially polarized.

JSC “NPO “GIPO” manufactures infrared polarizer-gratings made from polyethylene. They are intended for a linear light polarization in transmission in the spectral range from 7 μm up to the millimeter wavelengths (up to 100 μm). The polarizer-gratings are designed by a copying method from an original ruled grating (RG). The groove frequency, their depth and the sizes of an operating aperture can be set when manufacturing a specific grating.

While making polarizer-gratings, one can encounter some problems concerning the equipment and substrate material properties. These problems are: air bubbles in the polarizer depth, polythickness of polarizer-gratings and defects in the form of rays on its surface (because of a tension between press plates). The thickness of any produced technical film is too insignificant that results in some troubles, when one removes the polarizer film from the RG and there is a high probability to damage the groove profile during a removal. Therefore the hoses of the same film are often used, it results in a two-fold increase of its thickness, but bubbles may appear.

In order to solve the problems concerning air bubbles and to maintain the optimal thickness of polarizer-grating, a mono-film has been made from polyethylene, 200 μm thick. A vacuum chamber has been used in the technological process. We have consequently obtained polarizer-gratings of an appropriate thickness without any defects such being the case the pressing timing has decreased by a factor of 3 and now it lasts for approximately 60 minutes.

C4.2 Модернизация программного обеспечения расчета дифракционной структуры синтезированных голограммных оптических элементов

Ю.И. Апрелев
АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В настоящее время наиболее прецизионными и универсальными бесконтактными методами контроля оптического качества асферических поверхностей линз и зеркал второго и высших порядков и контроля юстировки телескопических систем являются лазерно-голографические методы и средства на основе применения осевых синтезированных голограммных оптических элементов [1].

Для изготовления синтезированных голограммных оптических элементов в АО «НПО «ГИПО» используются уникальные круговые делительные машины типа МДА и МДГ и специальные бицилиндрические и трапециидальные алмазные резцы [1, 2]. Технологический процесс изготовления этих синтезированных голограммных оптических элементов на круговых делительных машинах является автоматизированным и управляется персональным компьютером.

В качестве исходной информации для управляющего персонального компьютера выступает файл с расчётными координатами радиусов колец изготавливаемой синтезированной голограммы (основной или юстировочной). Этот файл имеет расширение «*.kod» и рассчитывается с помощью пакета оригинальных программных средств, разработанных ранее в АО «НПО «ГИПО».

Недостатком этих программных средств является то, что в алгоритме расчёта предусмотрен лишь случай автоколлимационного хода лучей в контрольной схеме на основе применения синтезированных голограмм. На практике же необходимо построение контрольных схем (для контроля оптического качества асферической оптики и контроля юстировки центрированных зеркальных телескопических систем) с неавтоколлимационным ходом лучей — из одной точки в другую. Для исправления этого имеющегося ограничения в расчётах контрольных схем и соответствующих синтезированных голограмм в настоящее время применяется универсальная лицензионная расчётная программа «Zemax» (США) [3]. Однако программа «Zemax» в результате расчёта выдаёт лишь характеристические коэффициенты синтезированной голограммы, представляющие собой 3—5 чисел, после чего требуется пересчёт в соответствующие координаты радиусов зон голограммы. Поэтому возникла задача преобразования выходных данных из программы «Zemax» во входные данные для управляющей программы круговой делительной машины с расширением «*.kod».

Алгоритм решения первой части этой задачи по преобразованию характеристических коэффициентов в соответствующие радиуса зон голограммы выполняется с помощью программного продукта «Mathcad» (США) [4]. Поэтому потребовалось создать прикладную программу по преобразованию радиусов зон синтезированной голограммы (файл с расширением «*.txt») в координаты радиусов подъёма и опускания алмазного резца (файл с расширением «*.kod»), при этом должна быть учтена толщина следа алмазного резца.

Алгоритм разработанной программы состоит из следующих основных шагов:

- радиусам зон синтезированной голограммы из выходного файла программы «Mathcad» присваивается индекс опускания резца;
- находится среднее значение между текущим и следующим радиусом, затем ему присваивается индекс подъёма резца;

- в выходном файле программы «Mathcad» радиуса зон синтезированной голограммы представляют собой числа с плавающей точкой, а входные данные для управляющей программы круговой делительной машины представляют собой целые числа, всегда состоящие из семи символов, где первые три символа обозначают миллиметры, следующие три — микрометры, а последний символ — десятые доли микрометра. Поэтому необходимо выполнить преобразование, в ходе которого, в зависимости от количества знаков перед точкой в значении из выходного файла «Mathcad», перед значением для управляющей программы круговой делительной машины будет добавляться необходимое число нолей;

- делается поправка координат подъёма и опускания резца с учётом толщины режущей части алмазного резца.

Описанный выше алгоритм был реализован в программной среде разработки Visual C++ 2005 [5]. Результаты расчёта (преобразования) данных, полученные с помощью разработанной прикладной программы с расширением «*.exe», были проверены в сравнении с ранее рассчитанными файлами. Сравнение показало хорошую сходимость результатов расчётов. Разработанная программа уже используется в расчётах для изготовления синтезированных голограмм, работающих в неавтоколлимационных контрольных схемах.

Источники

[1] 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.
Белозёров А.Ф. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения: Часть II / А.Ф. Белозёров, Н.П. Ларионов, А.В. Лукин, А.Н. Мельников // Фотоника. — 2014. — №5. — С. 30–41.
[2] ОСТ 3-4730-80 — ОСТ 3-4732-80. Сборник отраслевых стандартов «Детали оптические с асферическими поверхностями. Метод контроля с использованием синтезированных голограмм».
[3] Zemax®: User's Manual. 2014.
[4] Mathcad®: User's Manual. 2012.
[5] Хортон А., Visual C++ 2005: базовый курс: Пер. с англ. — М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. — 1152 с.

Software updating designed to compute the diffraction structure of computer-generated hologram optical elements

Yu.I. Aprelev
JSC "NPO "State Institute of Applied Optics", Kazan, Russia

Nowadays the most precise and universal noncontact methods used to control the optical quality of aspherical surfaces of lenses and mirrors of the second and higher orders and to monitor the alignment of telescopic systems are laser and holographic methods and facilities using on-axis computer-generated hologram optical elements (CGHOEs) [1]. Unique circular ruling engines (types MDA and MDG) and special bicylindrical and trapezoidal diamond tools [1] are used to fabricate CGHOEs at JSC "NPO "GIPO".

Source information for the control computer is a file (the "*.kod" extension) containing the computed radii coordinates of rings of a CGHOE to be made, that is computed using the original software, developed earlier at GIPO, whose disadvantage is its capability to compute only the

autocollimating travel of beams in the test circuit. And practical work requires a construction of a test circuit featuring a non-autocollimating travel of beams — from one point to another one. This limitation has been overcome by the application of the "Zemax" program (USA). However, the "Zemax" program presents as a result of computations only characteristic coefficients of a CGHOE, which demand to get radii of zones of a hologram recomputed into appropriate coordinates. So there appeared a problem of transforming "Zemax" output data into input data for a control program of the circular ruling engines featuring the "*.kod" extension.

The algorithm developed to solve the first part of this problem for transforming characteristic coefficients into appropriate radii of zones of a CGHOE is executed through the Mathcad program (USA). So we were to develop an application program for transforming radii of zones of a CGHOE (the "*.txt" file) into radii coordinates of a diamond tool lift and descent (the "*.kod" file), taking the track thickness of the diamond tool into account. This program was implemented in the development framework "Visual C++ 2005" [2]. The results of data computations, obtained through the use of the developed software, were verified in comparison with the earlier computed files. The comparison showed a good convergence of the computing results. The developed program has already been applied in computations while fabricating CGHOEs which operate in the non-autocollimating test circuits.

References

[1] Belozerov A.F. On-axis computer-generated hologram optical elements: history of development and application: Part I / A.F. Belozerov, N.P. Larionov, A.V. Lukin, A.N. Melnikov // Fotonika. — 2014. — №4. — P. 12–32 (in Russian).
Belozerov A.F. On-axis computer-generated hologram optical elements: history of development and application: Part II / A.F. Belozerov, N.P. Larionov, A.V. Lukin, A.N. Melnikov // Fotonika. — 2014. — №5. — P. 30–41 (in Russian).

[2] Horton A. Beginning Visual C++ 2005: Translated from English. — M.: OOO "I.D. Williams", 2007. — 1152 p. (in Russian).

С4.3 Изготовление голограммной дифракционной решетки для рамановского спектрометра с кодирующей апертурой

А.А. Белокопытов[1], Ф.А. Саттаров[1], Н.М. Шигапова[1], Э.Р. Муслимов[1, 2], И.И. Ахметшина[1, 2]
[1] АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия
[2] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

Методы Рамановской спектроскопии широко применяются в таких областях как медицина, биология, фармация, пищевая промышленность и др. Рамановские спектрометры постоянно совершенствуется, повышается их спектральное разрешение и чувствительность, уменьшаются габариты. Параллельно внедряются новые методики измерения и обработки информации, позволяющие повысить функциональные характеристики приборов, используемых в данной области. В настоящей работе мы рассматриваем использование оптической схемы на базе вогнутой голограммной дифракционной решетки для создания Рамановского спектрографа с кодирующей апертурой.

Кодирующие апертуры используются в ряде измерительных методов [1] и в настоящей работе подробно не рассматриваются. Особенностью их использования в спектроскопии является, в том числе, ужесточение требований к характеристикам схемы спектрографа. Помимо традиционных для спектроскопии комбинационного рассеяния требований к светосиле и дисперсии особое значение в данном случае имеет способность оптической схемы передавать изображение прямоугольной кодирующей маски без искажений и с высоким разрешением на любой длине волны рабочего диапазона.

Практика расчетов показала, что подобные требования удается выполнить в схеме, включающей вогнутую голограммную дифракционную решетку 1-го поколения [2] (т.е. записываемую парой точечных когерентных источников) и дополнительную линзу. В отличие от большинства известных схемных решений вспомогательная линза имеет значительную положительную оптическую силу и удалена от плоскости регистрации изображения.

Рассмотрим оптическую схему спектрометра для диапазона 815–915 нм, строящего спектральное изображение маски размером 2×3 мм с обратной линейной дисперсией 8 нм/мм.

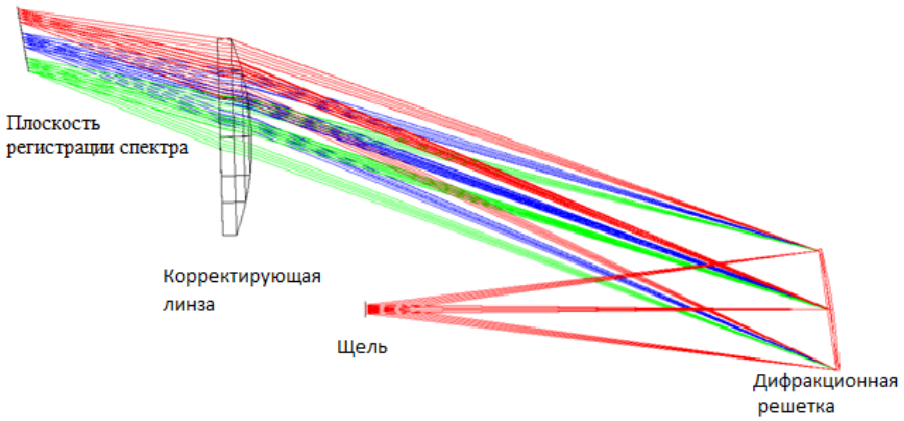


Рис. 1. Оптическая схема спектрометра

Общий вид оптческой схемы спектрометра представлен на рис. 1. Схема включает вогнутую голограммную решетку с частотой штрихов 719,22 штр/мм и корректирующую

кварцевую линзу с фокусным расстоянием 150 мм. Входной пучок имеет числовую апертуру 0,16.

Схема заполнения поля зрения спектрометра приведена на рис. 2 (отмечены средняя и крайние длины волн). Очевидно, что схема обеспечивает высокое пространственное и спектральное разрешение при отсутствии искажений и увеличении, близком к 1.

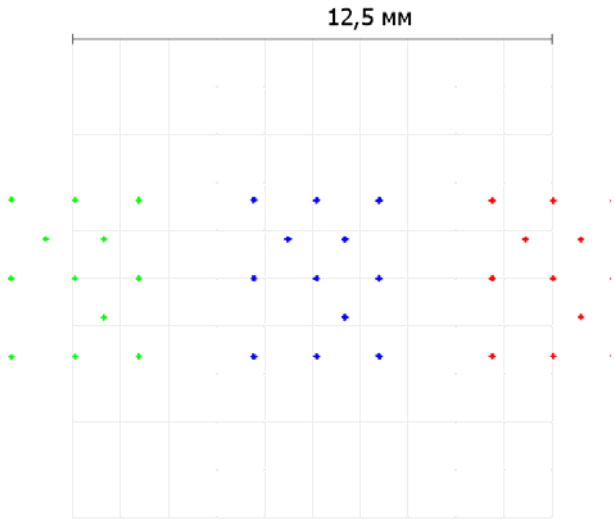


Рис. 2. Схема заполнения поля зрения спектрографа

Спектральное разрешение схемы было определено на основании анализа аппаратных функций (АФ). Ширина входной щели принималась равной 30 мкм, рассматривалась точка в центре кодирующей маски. Ширина АФ по уровню 0,5 составила 34,6; 31,7 и 30,7 мкм для длин волн 815, 865 и 915 нм соответственно. Следовательно, спектральное разрешение составит 0,25–0,28 нм.

Табл. 1. Требования к точности изготовления и сборки

Параметр \ Поверхность	Решетка	1-я поверхн. линзы	2-я поверхн. линзы	Фотоприемник
Радиус кривизны (общая ошибка)	1 инт. кольцо	3 инт. кольца	5 инт. колец	—
Радиус кривизны (местная ошибка)	0,3 инт. кольца	0,3 инт. кольца	0,5 инт. кольца	—
Расстояние перед поверхностью	0,04 мм	0,04 мм	0,05 мм	0,02 мм
Разворот отн. X	0,1°	0,03°		0,1°
Децентрировка по У	0,05 мм	0,05 мм	—	0,1 мм
Угловые координаты источников записи	$\delta i_1 = 1{,}3'$ $\delta i_2 = 1{,}2'$	—	—	—
Линейные координаты источников записи	$\delta d_1 = 0{,}035$ мм $\delta d_2 = 0{,}023$ мм			
Параметры материала	—	$\delta n = 0{,}0001$ $\delta v = 2$	—	—

Наличие дополнительного оптического элемента, а также необходимость обеспечивать высокое качество изображение по протяженному полю зрения обуславливают ужесточение допусков на изготовление дифракционной решетки и сборку схем. В табл. 1 приведены допуски на параметры схемы спектрометра (допустимым снижением качества изображения считалось 10% увеличение геометрических аберраций).

Полученная схема для Рамановского спектрометра обеспечивает высокое качество изображения, отличается минимальным количеством оптических элементов и конструктивной простотой. Среди недостатков можно указать увеличение значений аберраций с ростом высоты щели, а также небольшое (около 15%) изменение линейного увеличения по полю зрения.

Голограммные дифракционные решетки с рассчитанными параметрами были успешно изготовлены в АО «НПО «ГИПО». Решетки записывались на слоях ХСП. Для создания пары точечных источников использовался светоделитель, разделяющий излучение от лазера на два пучка, микрообъективы, формирующие записывающие пучки заданной апертуры и точечные диафрагмы, осуществляющие их пространственную фильтрацию.

Голограммные решетки для спектрографа аттестованы по дифракционной эффективности в рабочем диапазоне и качеству изображения. Следующим этапом работы является сборка и испытание макета спектрографа в лаборатории ООО «Карс технолоджи» — основного разработчика рассматриваемого прибора и метода.

Источники

[1] Grindlay J. Optimizing wide-field coded aperture imaging: radial mask holes and scanning / J. Grindlay, J. Hong // SPIE Proc. — 2003. — Vol. 5168. — P. 402.
[2] Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками — Казань: Изд-во КГТУ, 2003. — 198 с.

Production of a holographic grating for a coded-aperture Raman spectrometer

A.A. Belokopytov[1], F.A. Sattarov[1], N.M. Shigapova[1], E.R. Muslimov[1, 2], I.I. Akhmetshina[1, 2]
[1] OJSC "NPO "State Institute of Applied Optics", Kazan, Russia
[2] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

Raman spectroscopy methods are widely used in medicine, biology, pharmaceutics etc. Raman spectrometers are constantly improved in terms of spectral resolution, sensitivity and size. In parallel, new methods of measurement and data processing are introduced to enhance Raman spectrometers performance. In the present work we consider use of an optical scheme based on a concave holographic grating for a Raman spectrometer with coding aperture.

Use of coding apertures in optical measurements is described else where [1]. This case is notable because of rigorous requirements to aperture, dispersion and resolution across a rectangular mask for all wavelengths within the working range.

Computations show that the requirements can be met in a scheme with 1st generation [2] concave holographic grating and an auxiliary lens. In contrast with ordinary geometry the lens has a significant positive optical power and it's shifted from the spectral image plane.

Let's consider a scheme of spectrometer for region between 815 and 915 nm, with coding mask dimensions 2×3 mm and reciprocal linear dispersion of 8 nm/mm. The scheme is presented on Fig. 1. It consists of a concave grating with grooves frequency of 719.22 mm^{-1} and a correcting lens made of fused silica with $f = 150$ mm. The entrance NA is 0.16.

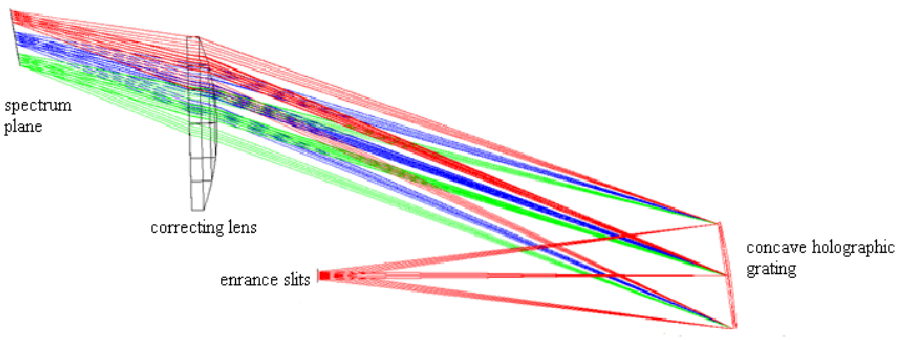


Fig. 1. The spectrometer scheme general view

The field of view filling scheme is shown on Fig. 2. One can see that a high spectral and spatial resolution is provided, while the image distortion is low and the linear magnification is close to 1.

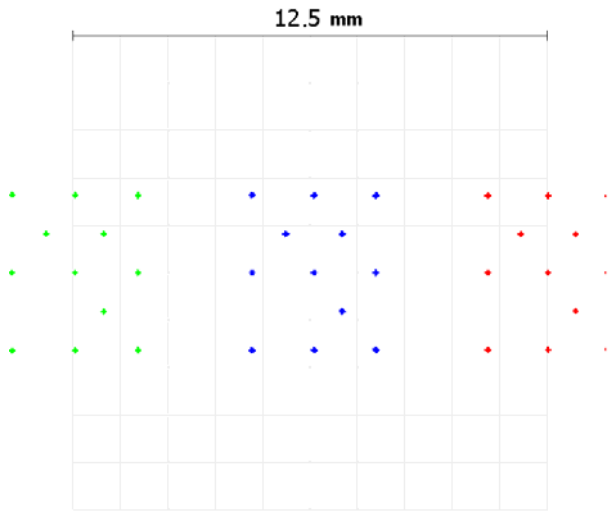


Fig. 2. The field f view filling scheme

The instrument functions FWHM for the entrance slit width of 30 μm is 34.6, 31.7 and 30.7 μm at 815, 865 and 915 nm, respectively. So the pectral resolution equals to 0.25–0.28 nm.

Due to increase of the optical elements number the tolerances on their manufacturing and assembly become tighter. For instance, tolerances on the recrding sources angular positions are 1.2–1.3 arc. min., while that on linear positions are 0.023–0.035 mm.

The designed holographic gratings were successfully manufactured in the State Institute of Applied Optics. The gratings are recorded on ChVs holographic media using a beamsplitter, two microlenses and two pinholes.

The gratings are tested for deiffraction efficiency and image quality. Assembly and testing of the spectrometer at “CARS Technology” (the main developer of the device) schould be the next stage of our work.

References

[1] Grindlay, J. Optimizing wide-field coded aperture imaging: radial mask holes and scanning / J. Grindlay, J. Hong / SPIE Proc. — 2003. — Vol. 5168. — P. 402.

[2] Pavlycheva N.K. Spectral instruments with non-classical diffraction gratings — Kazan: KSTU, 2003. — 198 p.

С4.4 Использование голограммных оптических элементов с коррекцией аберраций в системах дополненной реальности

И.А. Гуськов, Э.Р. Муслимов, И.И. Ахметшина
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

В настоящей работе рассматриваются использование голограммных элементов для коррекции аберраций [1] в системах дополненной реальности. Проектирование подобных систем имеет ряд особенностей [2]. В первую очередь, наголовное расположение устройства подразумевает его минимальные габариты и сложную внеосевую компоновку. При этом, как и для многих других визуальных систем, требования к полю зрения и разрешению достаточно высоки. Выполнить все вышеперечисленные требования одновременно зачастую оказывается невозможным. Разработчики подобных систем, как правило, вынуждены использовать чрезвычайно сложные децентрированные линзовые проекционные объективы, сложные асферичские поверхности, а также преднамеренно допускать увеличение дисторсии в системе (при условии ее последующей коррекции программными методами). В настоящей работе мы рассматриваем перспективы применения голограммного оптического элемента для создания системы, свободной от указанных недостатков.

В качестве примера рассмотрим систему со следующими параметрами: рабочая длина волны 520 нм, фокусное расстояние 25 мм, относительное отверстие 1:8, поле зрение 20×15°. Система состоит из светоделительного элемента — дихроичного зеркала, и линзового проекционного объектива, ее общий вид представлен на рис. 1

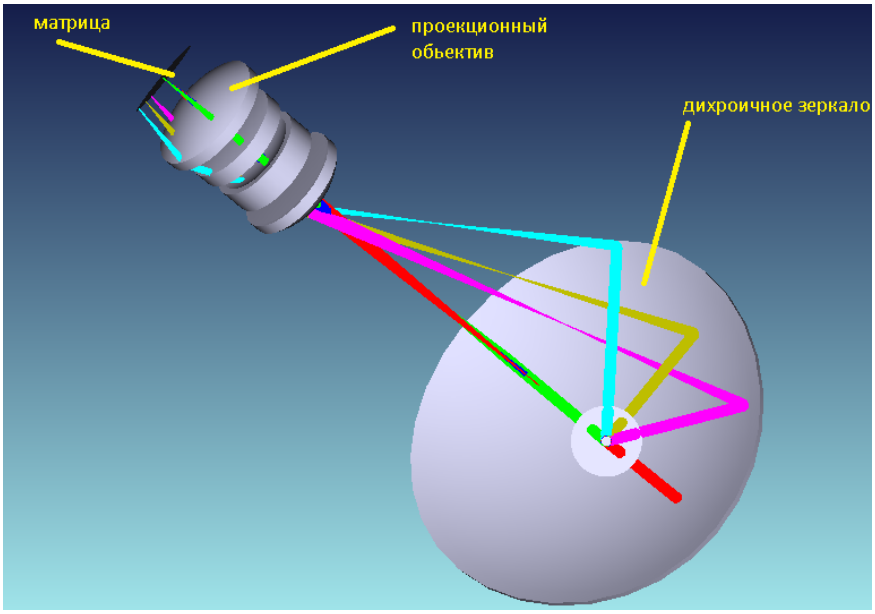
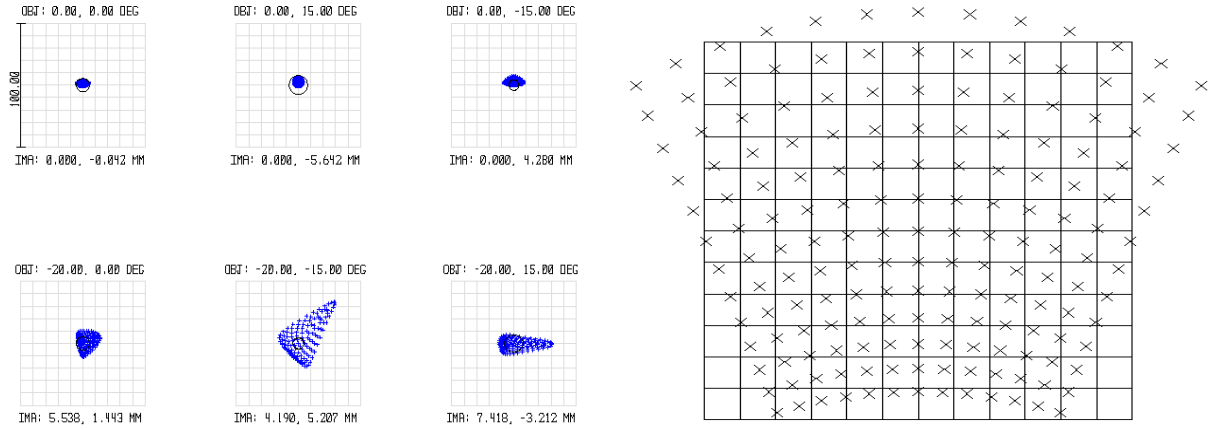


Рис. 1. Общий вид оптической системы с дихроичным зеркалом

Для демонстрации качества изображения, достигаемого в системе, приведем точечные диаграммы и диаграмму дисторсии (рис. 2) Среднеквадратический диаметр пятна рассеяния составляет от 2,8 до 19,7 мкм по полю зрения, в то время, как дисторсия составляет не менее 27,4%.



а) точечные диаграммы б) диаграмма дисторсии

Рис. 2. Показатели качества изображения для системы с дихроичным зеркалом

Светоделительный компонент может быть выполнен в виде узкополосной объемно-фазовой голограммы. Подобный компонент может служить не только для разделения пучков по их спектральному составу, но и для фокусировки пучков или коррекции аберраций. Запись корректирующей голограммы в данном случае требует использования аберрированных пучков сложной конфигурации. Они могут быть описаны с помощью полиномов Цернике [2] и реализованы, в частности, с использованием пространственного модулятора света [3]. Вариант схемы записи такой корректирующей голограммы с помощью двух волновых фронтов — сферического и аберрированного, представлен на рис. 3. Длина волны записи составляет $\lambda = 532$ нм, максимальная разность хода — 512 мкм.

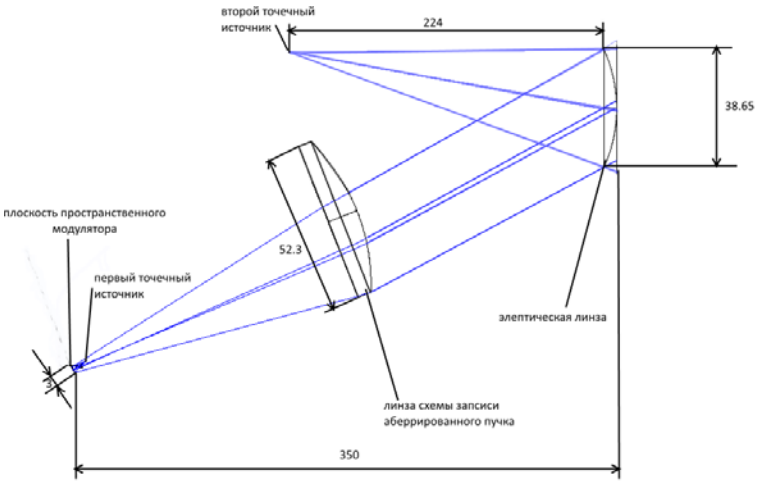


Рис. 3. Схема записи голограммного компонента

Оптическая схема дисплея, полученная после замены дихроичного зеркала на голограммный компонент и проведения численной оптимизации, показана на рис. 4. Из рисунка видно, что проекционный объектив содержит 3 линзы вместо 4, а величины их децентрировок значительно уменьшены.

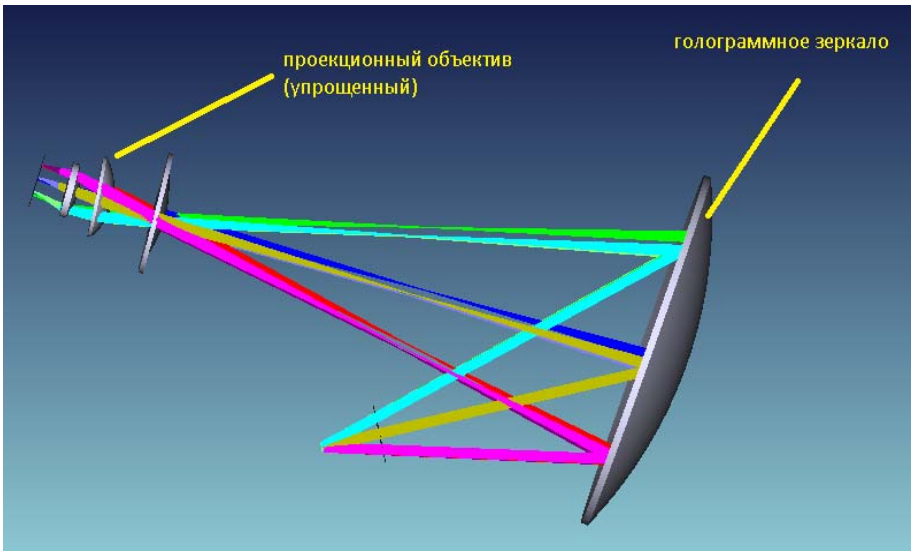
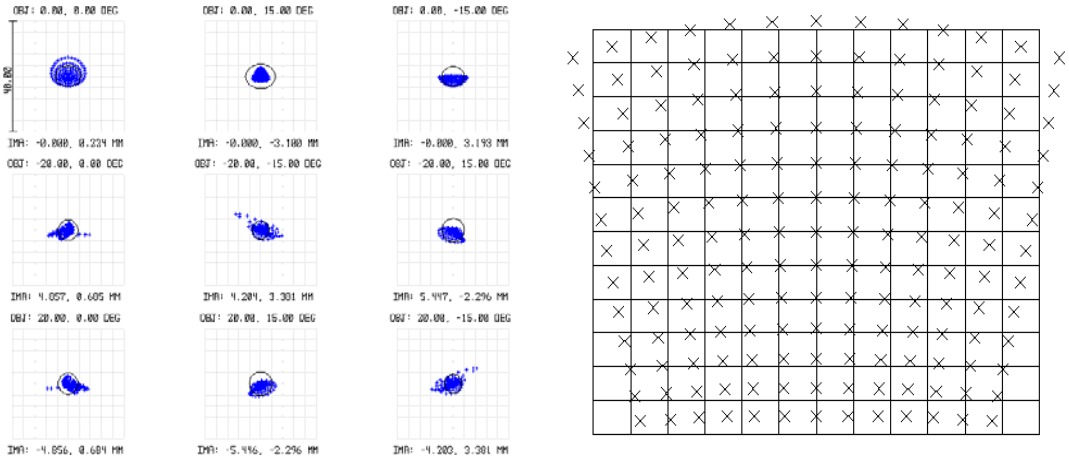


Рис. 4. Общий вид оптической системы с голограммным компонентом

Аналогично, приведем точечные диаграммы и диаграмму распределения дисторсии поп полю зрения (рис. 5). Среднеквадратический радиус пятна равен 2,3–3,9 мкм, а дисторсия не превосходит 16,6%.



а) точечные диаграммы б) диаграмма дисторсии

Рис. 5. Показатели качества изображения для системы с голограммным компонентом

Таким образом, показано, что использование голограммного компонента с коррекцией аберраций позволит упростить оптическую схему и повысить качество изображения наголовного дисплея для системы дополненной реальности.

Источники

[1] Lukin A.V. et al Denisyuk hlograms on “thick” DCG layers as optical elements: selective mirrors, NOTCH-filters and diffraction gratings // Proc. of All-Russian Seminar “Yu.N. Denisyuk — founder of the domestic holography”, S-Petersburg, May 22–24, 2007. — P. 144–147.
[2] Hui Li. Review and analysis of avionic helmet-mounted displays // Optical Engineering. — 2013. — 52 (11). — P. 110901.
[3] Zemax. User Manual / Zemax Dev. Corp. 2009. — 102. — P. 106.
[4] Spatial Light Modulators XY Series — Complete, all-in-one system / URL: http://www.hamamtsu.com.

Use of aberration-corrected holographic optical elements in augmented reality systems

I.A. Guskov, E.R. Muslimov, I.I. Akhmetshina
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

In the present work we consider use of holographic elements for aberration correction [1] in augmented reality systems. Such systems are usually head-up mounted that implies minimal size and complex off-axis geometry. At the same time, as other visual systems they have strict requirements for the field of view and resolution. Developers f such systems have to use highly complicated decentered systems and aspheres, as well as to introduce non-corrected distortion. We consider prospects of use of a holographic ptical elements for creation of system, which would be free of these disadvantages.

We demonstrate the principle on the following system: the working wavelength is 520 nm, the focal length is 25 mm, the *f*-ratio is 8 and the field of view is 20×15°. The optical system consists of a dichroic mirror and a projection lens (see Fig. 1).

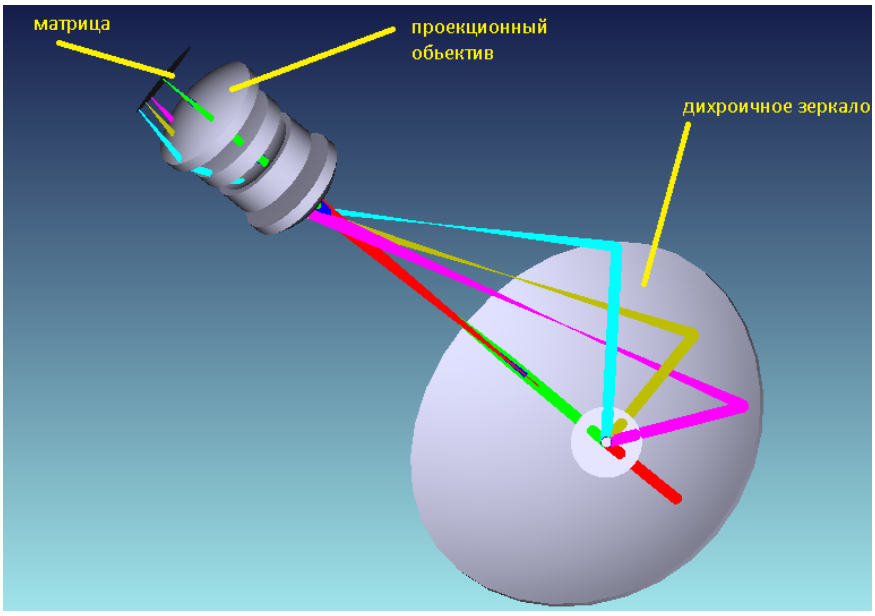
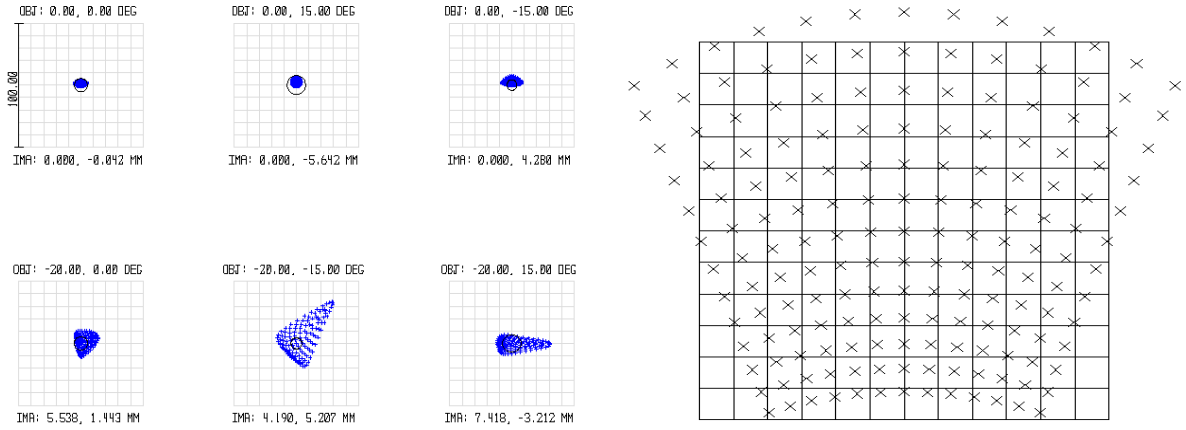


Fig. 1. General view of the system with dichroic mirror

The achieved image quality can be seen on spot diagrams and distortion plot (Fig. 2). The spots RMS radii are from 2.8 to 19.7 μm, while the distortion reaches 27.4%.

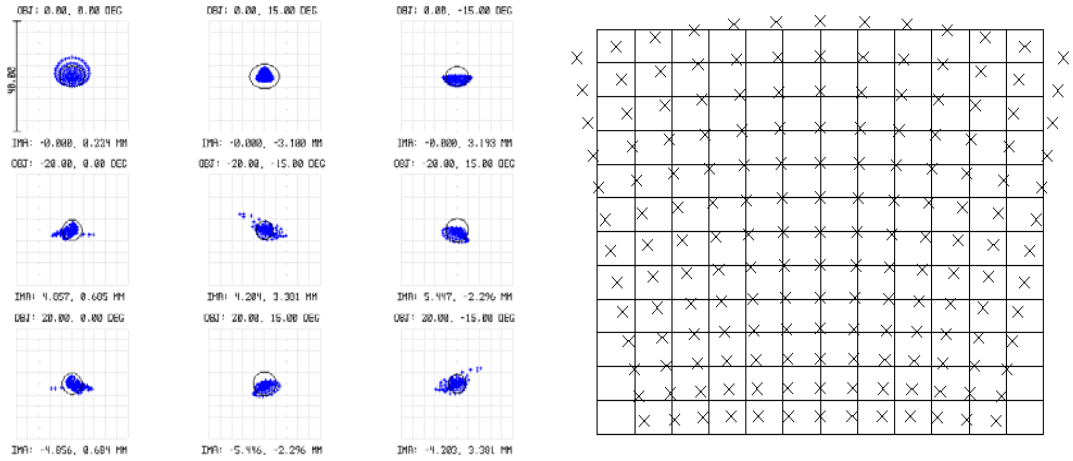
The image combiner can be implemented as a selective volume hologram. Such an element can have focusing and correcting properties in addition to splitting ones. Here we consider a hologram recorded by two beams — spherical and aberrated ones. The latter beam is described by Zernike polynomials [2] and formed by an SLM [3]. The hologram is recorded on 532 nm, and the maximum path difference introduced by SLM is 512 μm.



a) spot diagram b) distorsion plot

Fig. 2. Image quality of the system with dichroic mirror

The 4-lens projection system can be replaced by a 3-lens one with considerably less decentering. The plots illustrating image quality are given on Fig. 3. The spots RMS radii are 2.3–3.9 μm, and the maximum distortion doesn't exceed 16.6%.



a) spot diagram б) distorsion plot

Fig. 2. Image quality of the system with hologram

Thus, use of the holographic element allows to simplify the optical scheme and improve image quality of a head-up display for an augmented reality system.

References

[1] Lukin A.V. et al. Denisyuk hlograms on "thick" DCG layers as optical elements: selective mirrors, NOTCH-filters and diffraction gratings // Proc. of All-Russian Seminar "Yu.N. Denisyuk — founder of the domestic holography", S-Petersburg, May 22–24, 2007. — P. 144–147.

[2] Li H. Review and analysis of avionic helmet-mounted displays // Optical Engineering. — 2013. — 52 (11). — P. 110901.

[3] Zemax. User Manual / Zemax Dev. Corp. 2009. — 102. — P. 106.

[4] Spatial Light Modulators XY Series — Complete, all-in-one system / URL: http://www.hamamtsu.com.

C4.5 Получение комбинированных голограммных и дифракционных оптических элементов методом плазмохимического травления

Г.Р. Сагателян[1], С.Б. Одиноков[1], А.С. Кузнецов[1], М.С. Ковалев[1], В.В. Попов[2]
[1] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Плазмохимическое или ионно-плазменное травление незаменимы в тех случаях, когда необходимо сформировать плазмонные дифракционные решетки поверхностным рельефом непосредственно на подложке. Плазмохимическое травление плазмонных и неплазмонных дифракционных решеток не имеют никакого принципиального различия. Поэтому в данной статье рассматривается только случай изготовления рельефно-фазовых дифракционных решеток.

Тестовые образцы были изготовлены с целью подтверждения результатов математического моделирования работы плазмонных дифракционных решеток. Параметры плазмонных дифракционных решеток, такие как период, глубина и форма канавок, материал металлизированного слоя, при их изготовлении назначались в соответствии с результатами математического моделирования. В ходе исследования всех характеристик образцов голограммных оптических элементов (ГОЭ) и дифракционных оптических элементов (ДОЭ) было проведено исследование образцов, полученных методом электронно-лучевой литографии.

В результате проделанной работы были получены образцы комбинированных ГОЭ-ДОЭ с периодом от 400 до 1500 нм и приемлемой скважностью.

Методом электронно-лучевой литографии в процессе выполнения данной работы был получен следующий образец.

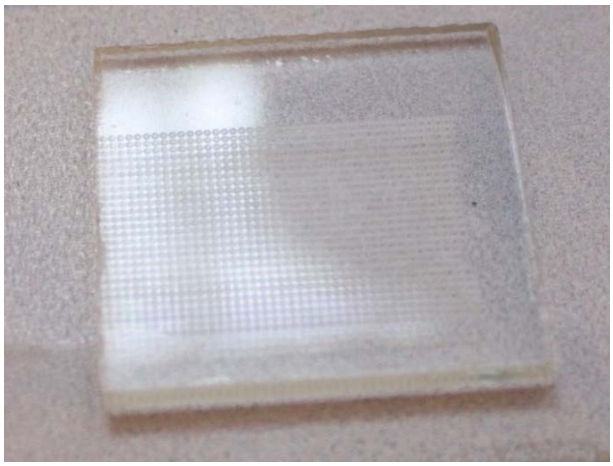


Рис. 1. Фотография образца

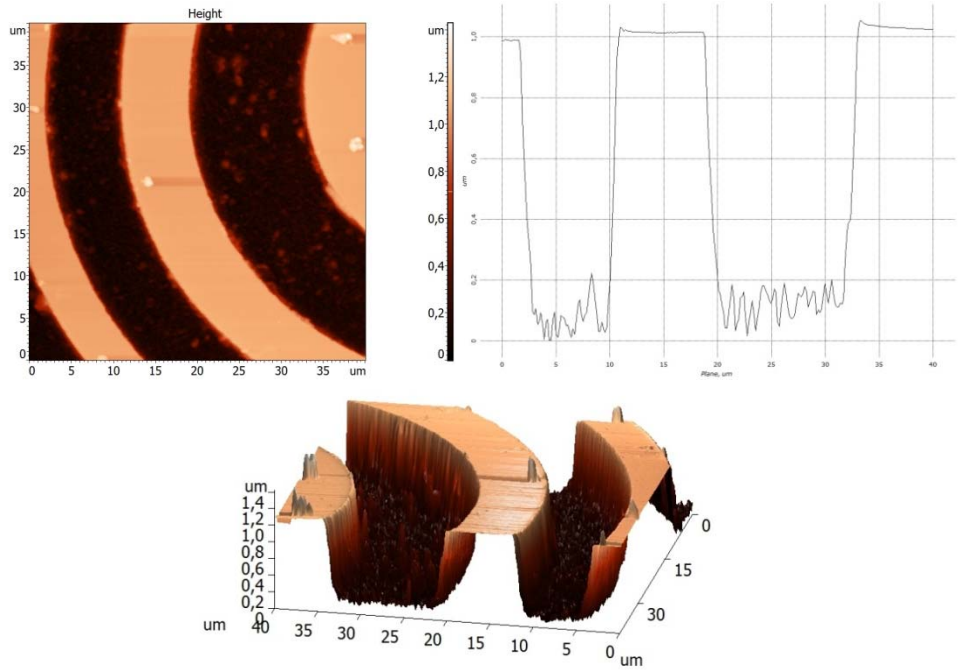


Рис. 2. Результаты измерения на атомно-силовом микроскопе (центральная зона)

Данный образец представляет собой дифракционную решетку, полученную в ходе экспонирования и проявления на электронно-лучевом микроскопе Zeiss EVO-MA-10. Важнейший параметр, который необходимо выдержать при изготовлении дифракционной решетки — это период.

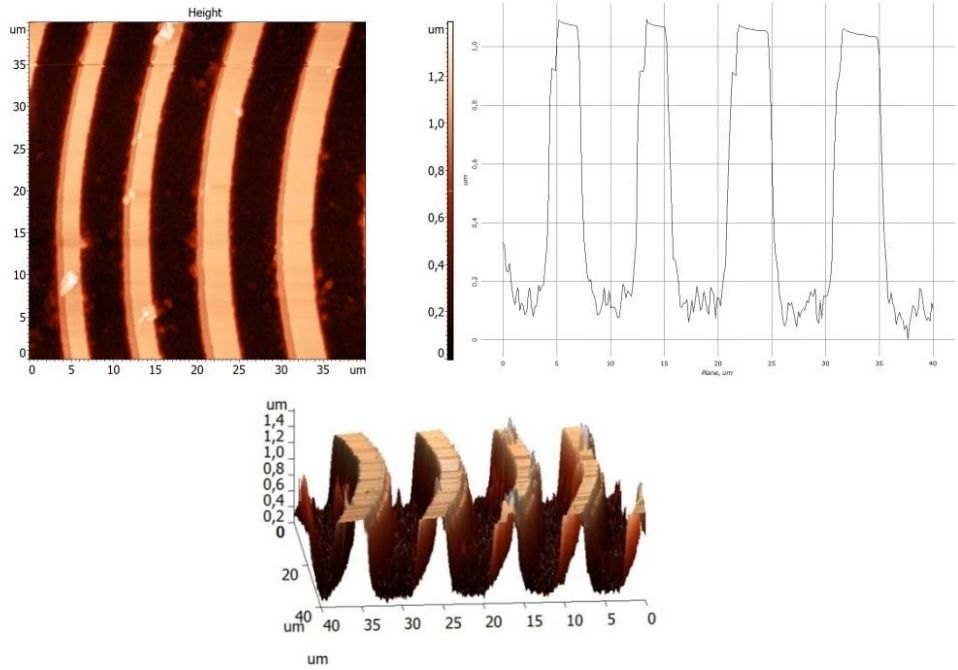


Рис. 3. Результаты измерения на атомно-силовом микроскопе (крайние зоны)

Исследование периода дифракционной решетки образца проводилось на оптическом микроскопе Zeiss Axio Imager Z2.

При изготовлении образцов большого размера данной технологией, наблюдается существенное изменение параметров электронного пучка, что приводит к появлению

недоэкспонированных и переэкспонированных участков на поверхности пластины, что также отрицательно влияет на конечный результат (качество получаемого ДОЭ).

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0115 (идентификатор проекта RFMEFI57714X0115)

Источники

[1] Одиноков С.Б. Расчет, конструирование и изготовление дифракционных и голограммных оптических элементов: учебное пособие / С.Б. Одиноков, Г.Р. Сагателян. М.С. Ковалев; МГТУ им. Н.Э. Баумана. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 121 с.

[2] Волков А.В. Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. — 1998. — №18. — С. 127–130.

[3] Одиноков С.Б. Технология изготовления дифракционных и голограммных оптических элементов с функциональным микрорельефом поверхности методом плазмохимического травления / С.Б. Одиноков, Г.Р. Сагателян // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2010. — №2. — С. 92–104.

Manufacturer of combined holographic and diffractive optical elements by plasma etching

G.R. Sagatelyan[1], S.B. Odinokov[1], A.S. Kuznetsov[1], M.S. Kovalev[1], V.V. Popov[2]
[1] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[2] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Plasma or ion-plasma etching is indispensable in those cases when it is necessary to form a plasmonic diffraction grating of the surface relief directly on the substrate. Plasma-chemical etching and Neoplatonic plasmon diffraction gratings have no fundamental differences. Therefore, this article only considers the case of manufacturing relief-phase diffraction gratings.

С4.6 Исследование спектрально-угловых характеристик комбинированных ГОЭ-ДОЭ с плазмонными дифракционными решетками и силовыми дифракционными элементами

А.Ю. Жердев, С.Б. Одиноков, Г.Р. Сагателян, М.В. Шишова, Л.А. Найден
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В данной статье объектом исследований являются образцы комбинированных голографических оптических элементов (ГОЭ) — дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с одномерной и двумерной плазмонной дифракционной решеткой (ПДР) с одной стороны и линзой Френеля и линзовым растром с другой.

Одномерные и двумерные ДР выполнены в виде серии параллельных канавок с квазисинусоидальным профилем, полученных в фоторезисте. Комбинированные элементы с линзой Френеля или линзовым растром с одной стороны и одномерной или двумерной дифракционной решеткой с другой стороны представлены на рис. 1.

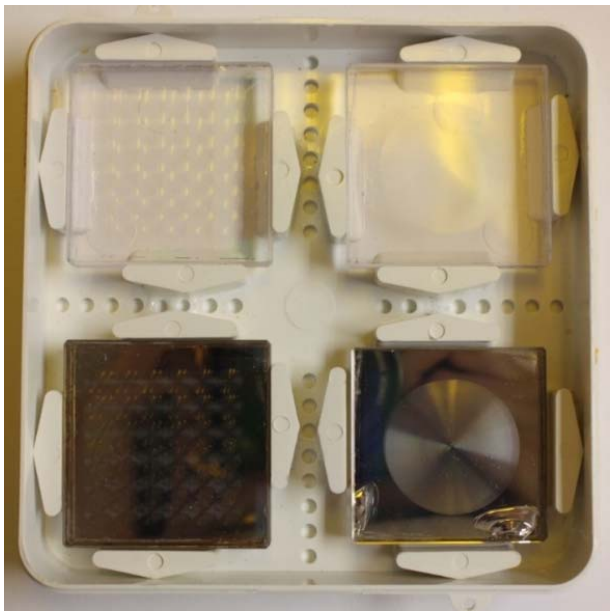


Рис. 1. Фотография образцов

Аналогично объектом исследований являлась двумерная дифракционная решетка. На решетку было произведено напыление серебра Ag. В ходе визуальных исследований образец освещался поляризованным и неполяризованным излучением от галогенной лампы без дополнительной оптики, и исходя из проведенных экспериментов можно сделать вывод, что образец обладает плазмонным эффектом. Фотографии образца в ТМ-поляризованном проходящем свете при разных углах поворота показаны на рис. 2–4.

На этапе визуальных исследований образец освещался ТМ-поляризованной расходящейся волной, проходящей образец на просвет.

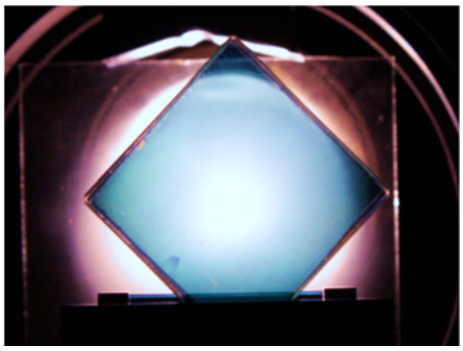


Рис. 2. Фотография образца в ТМ-поляризованном проходящем свете при угле поворота 0°

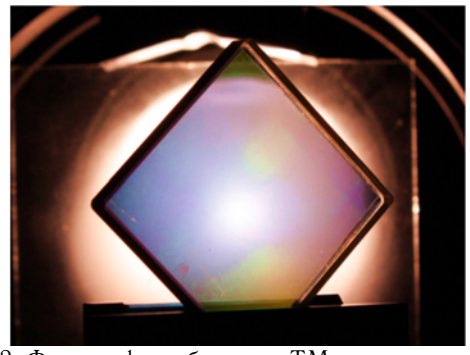


Рис. 3. Фотография образца в ТМ-поляризованном проходящем свете при угле поворота 30°

Рис. 4. Фотография образца в ТМ-поляризованном проходящем свете при угле поворота 60°

Далее создавался образец, который представляет собой комбинированный элемент с линзовым растром с одной стороны и плазмонной дифракционной решеткой (ПДР) с другой стороны с напылением серебра Ag. В ходе визуальных исследований образец освещался поляризованным и неполяризованным излучением от галогенной лампы без дополнительной оптики, и исходя из проведенных экспериментов можно сделать вывод, что данный образец обладает слабым плазмонным эффектом.

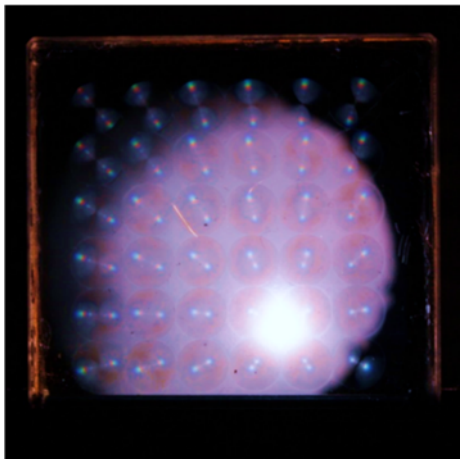


Рис. 5. Образец, угол поворота образца 0°

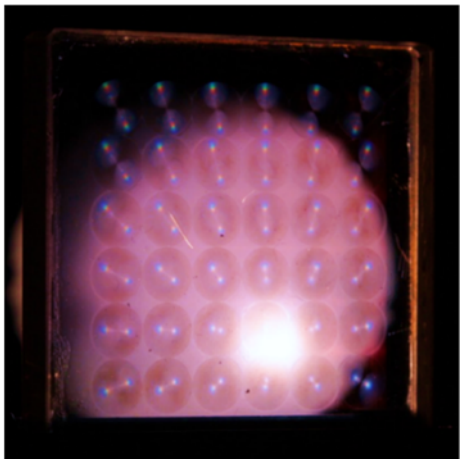


Рис. 6. Образец, угол поворота образца 30°

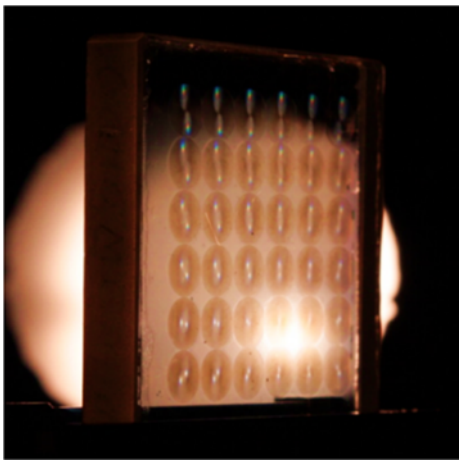


Рис. 7. Образец, угол поворота образца 60°

Экспериментальные подтверждения наличия слабого плазмонного эффекта представлены на рис. 5–7.

При установке образца под углом 30° к направлению распространения света, образец ПДР окрашивался в розоватый цвет, а при углах падения 60° образец окрашивался в желтоватый цвет как показано на рис. 5–7. Исходя из наблюдений можно сделать вывод о подтвержденных на практике теоретических исследований плазмонного эффекта.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0115 (идентификатор проекта RFMEFI57714X0115)

Источники

[1] Одиноков С.Б. Технология изготовления дифракционных и голограммных оптических элементов с функциональным микрорельефом поверхности методом плазмохимического травления / С.Б. Одиноков, Г.Р. Сагателян // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2010. — №2. — С. 92–104.

[2] Казанский Н.Л. Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики // Известия Самарского научного центра РАН. — 2011. — Том 13. — №4-1. — С. 54–62.

[3] 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.

The study of spectral-angular characteristics combined with HOE-DOE plasmon grating diffraction and power elements

A.Y. Zherdev, S.B. Odinikov, G.R. Saghatelian, M.V. Shishova, L.A. Nayden
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

In this article the object of research are the samples of the combined holographic optical elements (HOE) — diffractive optical elements (DOE) with the one-dimensional and two-dimensional plasmon diffraction gratings (PDG) on one side and a Fresnel lens and the lens raster on the other.

C4.7 Голограммная дифракционная решетка с коррекцией комы в широком спектральном диапазоне

Р.Р. Ахметгалеева, Н.К. Павлычева
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

В настоящее время малогабаритные спектральные приборы, работающие в широком спектральном диапазоне, достаточно широко используются, в частности, при исследовании флуоресценции. Одним из наиболее востребованных спектрофлуориметров является «Флюорат 02-3М» со следующими характеристиками: спектральный диапазон 250–900 нм, относительное отверстие 1:4, ширина входной щели 200 мкм (0,2 мм), спектральное разрешение 4,5 нм. Однако этот спектрофлуориметр имеет достаточно низкое спектральное разрешение, т.к. выделение требуемого спектрального диапазона осуществляется набором светофильтров. Нами предлагается оптическая схема спектрофлуориметра на основе голограммной дифракционной решетки с плоским полем.

Расчет оптической схемы на плоской поверхности основывается на использовании аберрационной функции голограммной дифракционной решетки. Эта функция имеет вид:

$$V(y,z) = -yF_0 + \frac{y^2}{2r}F_1 + \frac{z^2}{2r}F_2 + \frac{y^3}{2r^2}F_3 + \ldots \quad (1)$$

Коэффициент F_1 характеризует фокусировку лучей в меридиональной плоскости, F_2 — в сагиттальной, F_3 характеризует меридиональную кому.

Равенство $F_i = 0$ (2) является условием коррекции аберрации, характеризуемой этим коэффициентом. Коэффициенты F_i для голограммной дифракционной решетки имеют вид:

$$F_i = M_i - \frac{k\lambda}{\lambda_0}H_i, \quad (3)$$

где M_i содержат параметры схемы, H_i содержат параметры голографирования, λ_0 — длина волны записи.

Для расчета спектрографа с плоским полем необходимо выполнение следующих условий минимизации аберраций на плоскости [1]:

$$\frac{\partial I_1}{\partial d'_{\text{Ср}}} = 0.$$

$$\frac{\partial I_1}{\partial I_1} = 0. \quad (4)$$

$$\frac{\partial I_2}{\partial I_2} = 0. \quad (5)$$

$$\frac{\partial I_3}{\partial I_3} = 0. \quad (6)$$

$$I_1 = \int_{\varphi_1'}^{\varphi_2'} F_1^2 d\varphi'.$$

$$I_2 = \int_{\varphi_1'}^{\varphi_2'} F_2^2 d\varphi'. \qquad (7)$$

$$I_3 = \int_{\varphi_1'}^{\varphi_2'} F_3^2 d\varphi'.$$

Плоскость фокусировки перпендикулярна лучу средней длине волны спектрального диапазона, дифрагированному в вершине решетки.

Для каждого значения расстояния от входной щели до вершины решетки d можно найти значения расстояния от вершины решетки до поверхности регистрации $d'_{\text{Ср}}$ и коэффициента H_l, при которых дефокусировка на плоскости минимальна. Из конструктивных соображений нами выбрана схема со следующими параметрами: рабочий спектральный диапазон 250–900 нм, угол падения на решетку (φ) 20°, $d = 90$ мм, $d'_{\text{Ср}} = 100{,}7$ мм, относительное отверстие 1:4, радиус кривизны (r) поверхности вогнутой голограммной дифракционной решетки (ВГДР) 100 мм, частота штрихов ВГДР в вершине (N) 441,54 штр/мм. При длине волны излучения записи равной 441,6 нм, полярные координаты источников записи относительно вершины ВГДР имеют следующие значения: (157,263 мм, 68°13′3″) и (121,591 мм, 47°11′25″). Обратная линейная дисперсия $d\lambda/dl = 22{,}65$ нм/мм. Аберрации приводятся в табл. 1, m и M — высоты луча на поверхности решетки в меридиональной и сагиттальной плоскости, соответственно.

Табл. 1. Аберрации оптической схемы с регистрацией спектра на плоскости

m	M	575 нм, $y' = 0$ мм		250 нм, $y' = -14{,}757$ мм		900 нм, $y' = 14{,}565$ мм		412,5 нм, $y' = -7{,}296$ мм		737,5 нм, $y' = 7{,}249$ мм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
12	0	0,111	0	−0,092	0	−0,179	0	0,073	0	0,028	0
6	0	0,059	0	−0,060	0	−0,076	0	0,032	0	0,024	0
−6	0	−0,062	0	0,082	0	0,064	0	−0,024	0	−0,033	0
−12	0	−0,122	0	0,176	0	0,127	0	−0,042	0	−0,067	0
0	12	−0,015	0,116	0,051	1,366	−0,053	−1,131	0,014	0,735	−0,037	−0,503
0	6	−0,004	0,058	0,013	0,684	−0,013	−0,566	0,004	0,368	−0,009	−0,252

Расчет аппаратных функций (АФ) проводится для ширины входной щели 0,2 мм. Предел разрешения δ, определяемый как ширина АФ на половине ее высоты, составляет 0,2 мм по всему полю. Спектральное разрешение данной оптической схемы, определяемое как $\delta \times d\lambda/dl\,\delta \times \frac{d\lambda}{dl}$, составляет 4,5 нм, что соответствует спектральному разрешению прибора «Флюорат 02-3М».

Основной аберрацией является дефокусировка. Остаточная дефокусировка может быть устранена при регистрации спектра на цилиндрической поверхности, либо при установке вблизи поверхности регистрации плосковогнутой линзы. Для схемы с цилиндрической поверхностью регистрации спектра $(R = 50$ мм$)$ определена поверхность наилучшей установки, для которой $d'_{\text{Ср}}$ составляет 101,6 мм. Аберрации на цилиндрической поверхности приведены в табл. 2. Учитывая, что приборы для исследования флуоресценции должны иметь большое относительное отверстие, дальнейшие расчеты проведены для относительного

отверстия 1:3. Расчет АФ проводится для ширины входной щели 15 мкм. Предел разрешения δ составляет для центра спектра 0,021 мм (спектральное разрешение 0,48 нм), для краев 0,063 мм (1,43 нм).

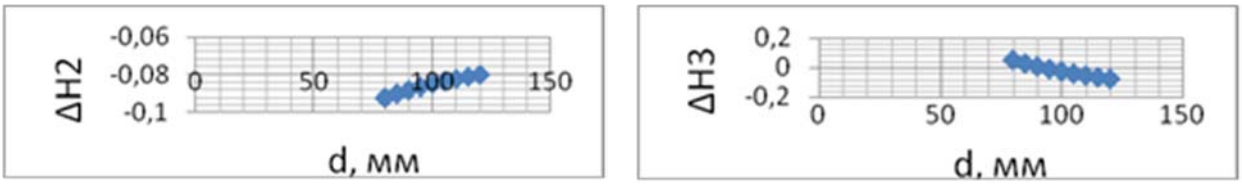
Табл. 2. Аберрации оптической схемы с цилиндрической поверхностью регистрации

m	M	575 нм, $y' = 0$ мм		250 нм, $y' = -14{,}571$ мм		900 нм, $y' = 14{,}389$ мм		412,5 нм, $y' = -7{,}322$ мм		737,5 нм, $y' = 7{,}276$ мм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
15	0	−0,004	0	0,090	0	−0,059	0	0,039	0	−0,037	0
7,5	0	0,005	0	0,026	0	−0,003	0	0,014	0	−0,001	0
−7,5	0	−0,005	0	0,003	0	−0,020	0	0	0	−0,012	0
−15	0	−0,004	0	0,019	0	−0,040	0	0,009	0	−0,021	0
0	15	−0,028	0,012	0,088	1,872	−0,076	−1,217	0,020	0,868	−0,059	−0,687
15	0	−0,007	0,006	0,022	0,939	−0,019	−0,608	0,005	0,435	−0,015	−0,343

Как видно из результатов расчета, для центра поля достигается высокое качество изображения, но на краях диапазона аберрации в меридиональной плоскости составляют 0,09 мм и 0,059 мм. Это ухудшение качества на краях спектра обусловлено меридиональной комой.

Коррекция меридиональной комы достигается при расчете оптической схемы по методу спектрографа с расширенным спектральным диапазоном [1]. Метод заключается в следующем. Определенным значениям φ и d соответствуют расстояния от вершины решетки до плоскости регистрации спектра $d'_{\text{Ср}}$, при которых условия равенства нулю F_2 и F_3 выполняются одновременно для двух длин волн $\lambda_{\text{Ср}} \pm (\lambda_1 - \lambda_2)/4$, где λ_1 и λ_2 — крайние значения длин волн спектрального диапазона. Эти длины волн расположены симметрично относительно центра спектрограммы, на равных расстояниях от центра и краев, следовательно, коррекция астигматизма и меридиональной комы для этих точек обеспечивает малые значения этих аберраций в широком спектральном диапазоне. Конструктивные параметры схемы связаны определенными соотношениями. Под широким спектральным диапазоном в данной схеме подразумевается диапазон в одну «октаву». Для спектрального диапазона 250–900 нм конструктивные параметры, рассчитанные по соотношениям для спектрографа с расширенным спектральным диапазоном, имеют следующие значения: $d = 100{,}058$ мм, $d' = 100{,}388$ мм, $\varphi = 9°57'51''$. Угол дифракции для длины волны 900 нм равен 12°57′54″, т.е. угол дифракции больше, чем угол падения. Такая схема конструктивно не реализуема.

Нами проведено исследование возможности исправления в требуемом спектральном диапазоне меридиональной комы и астигматизма. Для различных d при $\varphi = 20°$ (угол падения лучей выбран из конструктивных соображений) из условия (4) определялись значения H_1 и $d'_{\text{Ср}}$. Затем были найдены значения коэффициентов H_2 и H_3, удовлетворяющие условиям равенства нулю астигматизма и меридиональной комы для 412,5 нм и 737,5 нм. На рис. 1 приведены зависимости d от разности значений коэффициентов для длин волн 412,5 нм и 737,5 нм. Из приведенных графиков видно, что коррекция астигматизма невозможна, а меридиональная кома может быть исправлена при $d = 93{,}217$ мм.



а) б)

Рис. 1. График зависимости d от ΔH_2 (а) и d от ΔH_3 (б)

Такая установка имеет следующие конструктивные параметры: $d = 93{,}217$ мм, $d'_{\text{Ср}} = 98{,}119$ мм, полярные координаты источников записи относительно вершины ВГДР (187,920 мм, 60°46′38″) и (151,671 мм, 42°40′4″). Аберрации приводятся в табл. 3.

Табл. 3. Аберрации оптической схемы с коррекцией комы

m	M	575 нм, $y' = 0$ мм		250 нм, $y' = -14{,}082$ мм		900 нм, y' = 13,907 мм		412,5 нм, $y' = -7{,}072$ мм		737,5 нм, $y' = 7{,}028$ 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	0,016	0	−0,022	0	0,004	0	−0,015	0
7,5	0	−0,001	0	−0,001	0	−0,003	0	−0,001	0	−0,002	0
−7,5	0	0	0	0,004	0	0,006	0	0,001	0	0,002	0
−15	0	0	0	−0,008	0	0,027	0	−0,007	0	0,012	0
0	15	−0,027	−0,005	0,068	1,772	−0,056	−1,180	0,011	0,813	−0,048	−0,672
0	7,5	−0,007	0,001	0,017	0,888	−0,014	−0,587	0,003	0,408	−0,012	−0,334

Расчет АФ проводился для ширины входной щели 15 мкм. Предел разрешения составил для центра поля 0,018 мм, для краев 0,027 мм и 0,033 мм, для точек коррекции меридиональной комы 0,015 мм и 0,024 мм. Спектральный предел разрешения составляет для центра поля 0,41 нм, для краев 0,61 нм и 0,75 нм, для точек коррекции меридиональной комы 0,34 нм и 0,54 нм. Из табл. 3 видно, что разрешение можно улучшить, уменьшив размер дифракционной решетки в сагиттальной плоскости. Так, при световом размере решетки 30×15 мм^2 спектральный предел разрешения составляет для центра поля 0,34 нм, для краев 0,48 нм и 0,54 нм, для точек коррекции меридиональной комы 0,34 нм и 0,48 нм.

Преимуществами предложенной схемы являются: отсутствие сменных элементов и движущихся частей, что обеспечивает надежную работу, минимум оптических компонентов, что обеспечивает низкий уровень рассеянного света, достаточно высокое относительное отверстие, более высокое спектральное разрешение, чем у устройств, основанных на фильтрах, максимальная компактность.

Источники

[1] Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. — Казань: Изд. Казан.гос.тех.университета, 2003. — 198 с.

Holographic diffraction grating with coma correction in the wide spectral range

R.R. Akhmetgaleeva, N.K. Pavlycheva
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

Currently compact spectral devices operating in a wide spectral range, is widely used in the study of fluorescence. One of the most popular spectrofluorimeter is «Fluorat 02-3M», with a spectral range of 250–900 nm. However, the spectrofluorimeter has a low spectral resolution. We propose the optical scheme of the spectrofluorimeter based on flat-field holographic diffraction grating, optical scheme with the cylindrical surface of the spectrum registration and optical scheme with coma correction [1].

The optical scheme of the spectrofluorimeter based on flat-field holographic diffraction grating has the following characteristics: spectral range 250–900 nm, $\varphi = 20^\circ$, $d = 90$ mm, $d' = 100.7$ mm, $N = 441.54$ l/mm, f-number is 1:4, the radius of the diffraction grating is 100 mm. The recording sources coordinates are: (157.263 mm, 68°13′3″) and (121.591 mm, 47°11′25″) for the recording wavelength of 441.6 nm. Reciprocal linear dispersion $d\lambda/dl = 22.65$ nm/mm. For optical scheme with the cylindrical surface of the spectrum registration $d' = 101.6$ mm, f-number is 1:3. The parameters of the optical scheme with coma correction: $d = 93.217$ mm, $d' = 98.119$ mm, the recording sources coordinates are (187.920 mm, 60°46′38″) and (151.671 mm, 42°40′4″).

The spectral resolution of the optical scheme with registration of the spectrum on the plane is 4.5 nm, when the width of the entrance slit is 200 μm; the optical scheme with the cylindrical surface of the spectrum registration is from 0.48 nm to 1.43 nm, when the width of the entrance slit is 15 μm; optical scheme with correction of coma is from 0.34 nm to 0.75 nm, when the width of the entrance slit is 15 μm.

The advantages of the proposed scheme: the absence of replacement or moving parts ensures reliable operation spectrofluorimeter, a minimum of optical components ensures low stray light, the relative aperture is sufficiently high, spectrofluorimeter has a higher spectral resolution than devices based on the filters.

References

[1] Pavlycheva N.K. Spectral devices with non-classical diffraction gratings. — Kazan: Publishing house of Kazan State Technical University, 2003. — 198 p.

С4.8 Интерферометры Физо на основе компьютерно-синтезированных голограмм

А.Г. Полещук, Р.К. Насыров
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Введение

Интерферометры — одни из самых точных измерительных приборов [1]. Микроэлектроника, оптика, лазерная техника, телекоммуникация, астрономия, прецизионная механика, измерительная техника не могли бы существовать без применения различных типов интерферометров. Качество оптических поверхностей определяется методами их контроля. Интерферометр должен формировать карту оптической поверхности без дисторсии, независимо от того, является ли поверхность плоской, сферической или асферической.

В настоящей работе рассмотрена конфигурация интерферометра Физо (ИФ), обсуждены характеристики и особенности схем. Основное внимание уделено применению синтезированных голограмм (СГ) в схемах ИФ на примере разработанного в ИАиЭ СО РАН и ЗАО «Дифракция» прибора ФТИ-100PS.

Особенности ИФ для контроля асферики

Интерферометры обычно строятся по схеме Физо, так как она требует минимума оптических компонентов. ИФ использует общий ход измерительного и опорных пучков света, поэтому на качество компонентов особых требований не накладывается. Упрощенная схема ИФ приведена на рис. 1а. Оптическое излучение от источника S с помощью светоделителя СД и объектива О1 направляется к эталонной пластине ЭП и далее к поверхности П контролируемого объекта. Излучение, отраженное от этой поверхности и от стороны А эталонной пластины (сторона Б имеет клин α) фокусируется объективом О1 в плоскости диафрагмы Д (точка S') и далее с помощью объектива О2 направляется к видеокамере ВК1. Одним из ключевых элементов ИФ является диафрагма Д, которая служит для блокировки паразитного излучения, в частности от стороны Б эталонной пластины (штриховая линия и точка S''). Размер диафрагмы d определяет пространственное разрешение прибора. Однако, если ИФ используется совместно с СГ, то размер диафрагмы определяться углами дифракции паразитных порядков. На рис. 1б показан пример положения ДП при контроле АП с помощью СГ [2]. Разумный выбор размера d диафрагмы позволяет минимизировать влияние паразитных ДП. Если поверхность диафрагмы Д имеет достаточную площадь, то с помощью второй видеокамеры ВК2 можно контролировать положение автоколлимационных пятен [3]. Этот метод реализован в ИФ типа ФТИ-100.

Для контроля сферических поверхностей в схему ИФ вместо ЭП устанавливают эталонный объектив (ЭО), причем выходная линза имеет апланатическую поверхность, которая являясь светоделителем, формирует опорный волновой фронт на отражение. Для контроля асферических поверхностей ЭО дополняются корректорами волнового фронта на основе СГ. Голограмма-корректор преобразует сферический волновой фронт W_1 с выхода ЭО в волновой фронт W_2, сопряженный с формой АП, как показано на рис. 2а. Эта схема имеет недостаток — точность всегда меньше, чем точность контроля плоских или сферических поверхностей. Это обусловлено, тем, что подложка СГ не входит в общий ход световых пучков ИФ и, следовательно, ее погрешность складывается с результатом измерения.

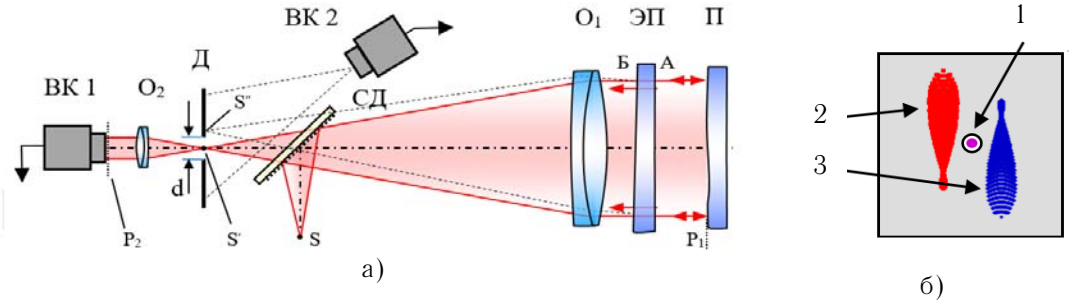


Рис. 1. Упрощенная схема ИФ (а) и положения паразитный ДП (б)

Одним из путей устранения указанных недостатков является применение «комбинированных синтезированных голограмм» (КСГ) [4]. Такие КСГ позволяют формировать два и более независимых волновых фронта одним элементом. На рис. 2б представлена схема контроля сферической (или асферической) поверхности эталонной КСГ работающим в параллельном пучке света [5]. Опорный плоский волновой фронт формируется при отражении от стороны А подложки. Использование параллельного пучка света позволяет существенно упростить юстировку КСГ. В предложенной схеме, подложка эталонного КСГ включена в общий ход световых пучков и ее неоднородности не влияют на точность измерения.

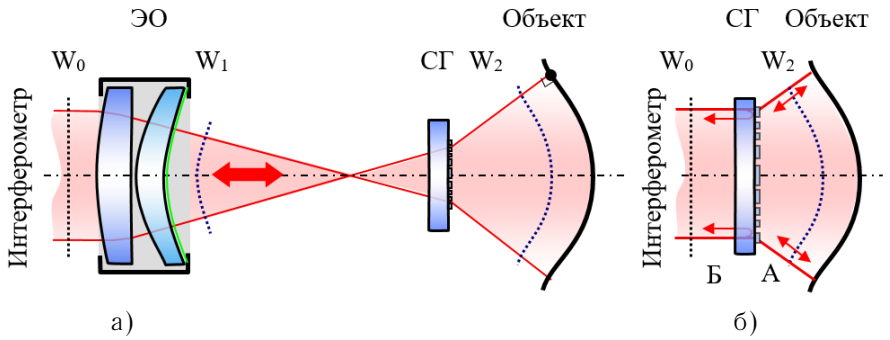


Рис. 2. Контроль асферической поверхности с помощью комбинации ЭО и СГ (а) и одного эталонного КСГ (б)

Пространственное разрешение ИФ

Этот параметр, на практике, обычно определяется количеством интерференционных полос, которое регистрируется видеокамерой прибора. Ряд современных ИФ позволяет регистрировать свыше 1000 полос (Sub-Nyquist method), что дает возможность проводить контроль формы АП с достаточно большим отклонением от ближайшей сферы без применения СГ. В этом случае диаметр диафрагмы (рис. 1а) должен быть около d ≈ 8 мм, а матрица видеокамеры иметь размерность не менее 4 Мп. Однако, работа с таким большим количеством полос нарушает принцип Физо, что с одной стороны приводит к снижению точности измерения и требует калибровки, а с другой увеличивает стоимость прибора из-за повышенных требований к качеству оптической системы.

Разумным компромиссом является использование сменных диафрагм, переключаемых по команде оператора. В одном из вариантов ИФ модели ФТИ-100 реализовано дистанционное переключение сменных диафрагм от d = 41,2 до 4,8 мм. На рис. 3 приведен пример рабочего окна интерферометра ФТИ-100 при контроле ∅100 мм пластины. В левой части окна располагается зарегистрированная интерферограмма (на рис. 3а количество полос — 110),

график скана полос по оси Y, таблица аберраций (коэффициентов полиномов Цернике), а в правой — фазовая карта (2-х или 3-мерная). Видно, что контраст интерференционных полос превышает 90%. На рис. 3б показана увеличенная (×10) интерферограмма центральной области (∅10 мм) контролируемой пластины. На рис. 3в показано окно вспомогательной видеокамеры (ВК2, на рис. 1) при увеличении 8×. Хорошо видны автоколлимационные пятна измерительного и опорного пучков, которые формируют интерференционную картину. Центр круговой сетки соответствует центру диафрагмы, а ее внешнее кольцо — угловому отклонению в 3′. Погрешность результатов измерения при изменении количестве полос с 10 до 100 не превышает λ/100 (RMS).

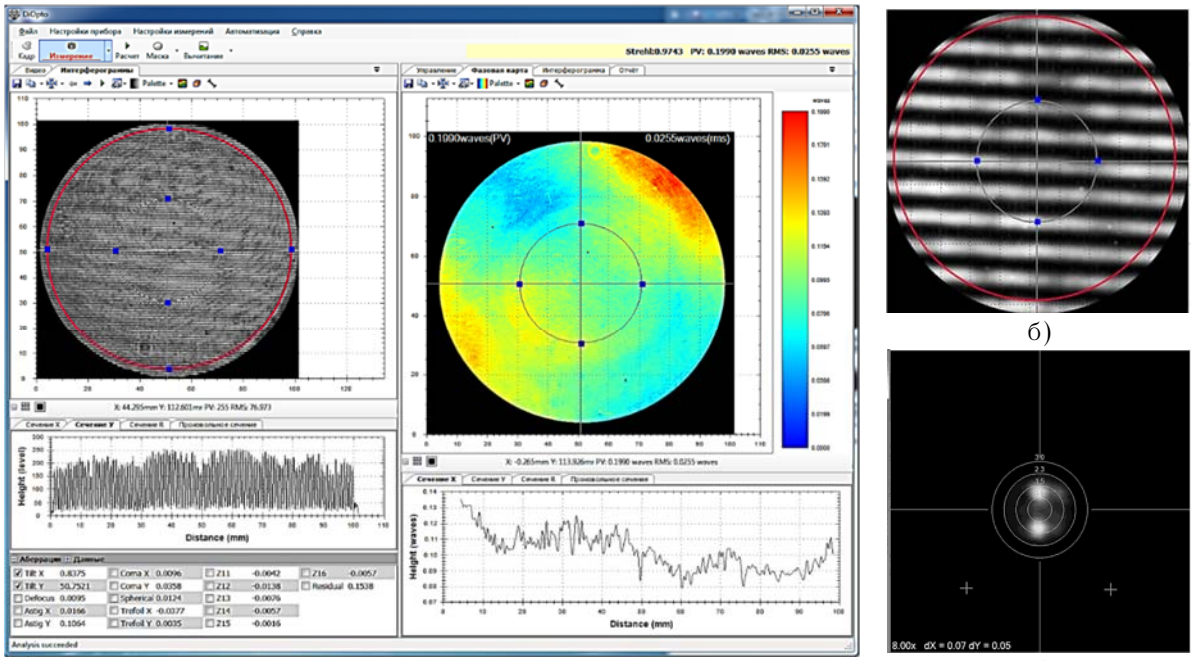
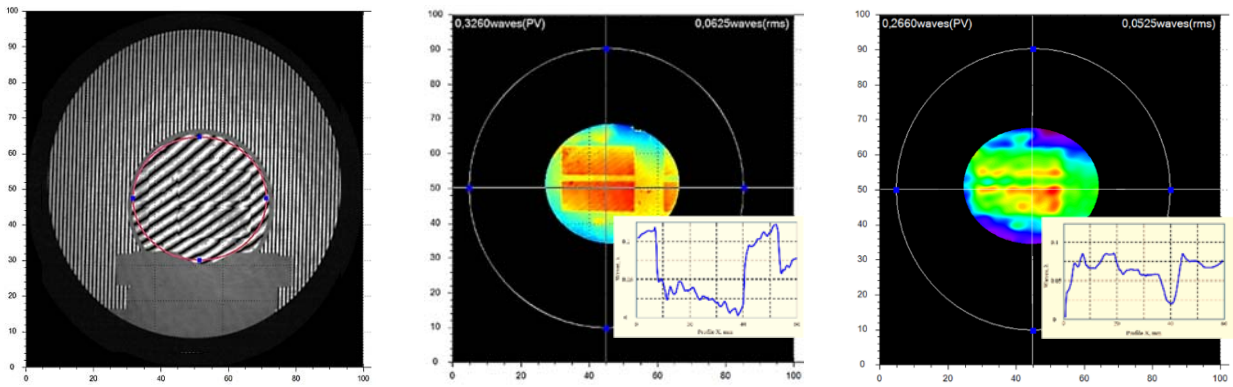


Рис. 3. Окна программы управления интерферометра ФТИ-100. Контроль плоскостности детали ∅100мм при количестве полос 110 (а), увеличенная центральная область ∅10 мм (б) и вид плоскости диафрагмы (в).



а б в

Рис. 4. Пример интерферограммы (а) и карт поверхности фазовой пластинки (диаметр 60 мм) полученные методами ВФЗ (б) и спектрального анализа (б)

Обработка интерферограмм

В интерферометре ФТИ-100 для восстановления формы волнового фронта и получения коэффициентов разложения по базису полиномов Цернике используется по выбору оператора методы ВФЗ (5 интерферограмм), СА на основе преобразования Фурье и метод прослеживания интерференционных полос [6]. Для увеличения точности восстановления формы волнового фронта при наличии турбулентности воздуха и вибраций предусмотрено автоматическое выполнение серии измерений с фильтрацией и усреднением результатов. Преимущество метода ВФЗ хорошо демонстрирует пример интерферограммы и карт поверхности фазовой пластинки приведённый на рис. 4. Видно, что метод ВФЗ воспроизводит прямоугольную форму рельефа фазовой пластинки, в то время как метод спектрального анализа ее сглаживает, как показано на графиках (см. врезки на рис. 4б и 4в).

Заключение

Представлены результаты разработки и исследования ИФ с фазовым сдвигом для высокоточного контроля оптических поверхностей. Предложенный ИФ типа ФТИ-100PS сочетает в себе функции интерферометра и фотоэлектрического автоколлиматора, что позволяет с высокой точностью проводить юстировку эталонных СГ и автоматизировать процесс настройки. Разработано оригинальное программное обеспечение для управления прибором и анализа интерферограмм.

Источники

[1] Малакара Д. Оптический производственный контроль. — М.: Машиностроение, 1985.
[2] Burge H. Measurement of aspheric mirror segments using Fizeau interferometry with CGH correction / H. Burge, C. Zhao, M. Dubin // SPIE Proc. — 2010. — Vol. 7739. — P. 773902.
[3] Патент №2432546 РФ. Интерферометр для контроля формы поверхности оптических деталей / А.Г. Полещук, А.Е. Маточкин. — Опубл. 27.10.2011.
[4] J.-M. Asfour, A.G. Poleshchuk. Asphere testing with a Fizeau interferometer based on a combined computer-generated hologram // JOSA A. — 2006. — 23. — №1. — P. 172–178.
[5] Патент №2534435 РФ. Эталонный дифракционный оптический элемент (Варианты) / А.Г. Полещук. — Опубл. 27.11.2014.
[6] Максимов В.Г. Метод повышения точности восстановления волнового фронта по набору интерферограмм / В.Г. Максимов, В. Тартаковский, А.Г. Полещук, А.Е. Маточкин, Р.К. Насыров // Автометрия. — 2011. — 47. — №6. — 82–91.

Fizeau interferometers on the base of computer-generated holograms

A.G. Poleshchuk, R.K. Nasyrov
Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Analysis of the laser interferometers for optical surface testing are presented. Methods of spherical and aspherical surfaces testing based on application of computer-generated holograms with laser interferometers are discussed. The results of development of the Fizeau interferometer with improved functionality and interferogram processing are presented. Key features and distinctive characteristics of the interferometer FTI-100 are considered.

С.4.9 Дифракционно-зеркальный высокоапертурный микрообъектив для фокусировки лазерного излучения в устройствах записи

А.Г. Полещук, А.Г. Седухин
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Численно исследована острая высокоапертурная фокусировка лазерного пучка при его кольцевом сведении и различных формах поляризации. В данной работе предполагается использование независимых от системы фокусировки преобразователей поляризации. Для организации кольцевого сведения пучка использована ранее предложенная система фокусировки [1] в виде (рис. 1) преобразователя поляризации лазерного пучка П, дифракционного оптического элемента (ДОЭ), преобразующего гауссово распределение интенсивности лазерного пучка в кольцевое распределение, а также кольцевого сферического зеркала (СЗ), имеющего зеркальное (металлическое) покрытие и обеспечивающего сохранение направления продольной компоненты падающего на зеркало светового пучка после его отражения (отражение лучей вперед). Указанный режим использования сферического зеркала существенно отличается от традиционного, при котором продольная компонента падающего на зеркало светового пучка и продольная компонента отраженного пучка имеют различные знаки (отражение лучей назад). Нами проанализированы функции рассеяния точки указанной системы фокусировки для таких типовых видов поляризации, как линейная, круговая, азимутальная и радиальная. Установлено, что при выбранном режиме работы сферического зеркала (отражение лучей вперед), функции рассеяния точки для линейной и круговой поляризации пучка существенно отличаются по своей форме и размерам от функций рассеяния, характерных для традиционного использования зеркала, при отражении лучей назад. Такое поведение объясняется особой трансформацией компонентов падающего линейно поляризованного пучка при отражении пучка от зеркала. А именно: в соответствии с граничными условиями электродинамики, зеркало инвертирует тангенциальную компоненту вектора напряженности электрического поля E в поперечной плоскости сечения зеркала (в плоскости, перпендикулярной оптической оси) и не изменяет радиальную компоненту указанного вектора. Соответственно, в векторной интегральной форме Дебая, описывающей распределение амплитуды поля вблизи фокальной точки, полярный угол θ замещается на $\pi - \theta$, а сомножители вида $1 \pm \cos\theta$ замещаются на $1 \mp \cos\theta$. При высокоапертурной кольцевой фокусировке, это влечет за собой существенное изменение формы функций рассеяния точки по отношению к случаю, когда зеркало используется в традиционном режиме (при отражении лучей назад).

При проведении численного моделирования, нами были приняты следующие параметры оптической системы. Лазерный пучок на входе дифракционного элемента имеет плоский волновой фронт, а его амплитудное распределение имеет гауссову форму, с распределением в перетяжке пучка вида $E_{\text{Вх}} = \exp\left(-r^2 / w_0^2\right)$, где r — поперечная радиальная координата, а $w_0 = 5{,}97$ мм — радиус шейки пучка по уровню $\exp(-2)$. Рабочая длина волны составляет $\lambda = 266$ нм. Для случая линейной поляризации, принимается, что пучок поляризован по поперечной координате X либо Y. Радиус кривизны кольцевого сферического зеркала составляет $R = 7$ мм. Расстояние между плоскостью дифракционного элемента и центром кривизны зеркала равно $Z = 40$ мм, а расстояние между центром кривизны зеркала и точкой стигматической фокусировки равно $z = 5{,}86$ мм. Минимальное значение полярного

угла при кольцевой фокусировке пучка составляет $\theta_{min} = 69{,}37^\circ$, а максимальное значение данного угла равно $\theta_{max} = 71{,}81^\circ$. Из этих данных следует, что числовая апертура рассматриваемой оптической системы составляет $NA = \sin\theta_{max} = 0{,}95$, а значение разности максимального и минимального полярного угла при кольцевой фокусировке равно $\theta_{max} - \theta_{min} = 2{,}45^\circ$. При этом, фактор кольцевого сжатия пучка можно оценить в виде соотношения $\varepsilon = (\theta_{max} - \theta_{min}) / \theta_{max} = 0{,}034$.

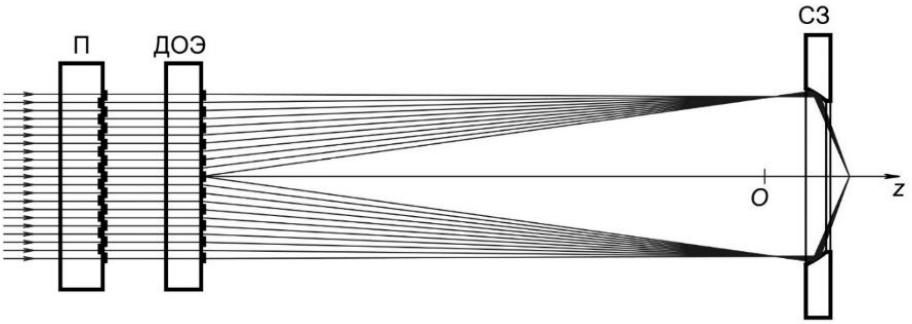


Рис. 1. Упрощенная схема дифракционно-зеркальный объектива

Расчет светового поля производился по формулам, учитывающим вышеприведенные параметры оптической системы и соответствующим модели высокоапертурной векторной фокусировки лазерного пучка в приближении Дебая [2]. Для случая использования рассмотренного в данной работе обращенного кольцевого сферического зеркала (ОКСЗ) и лазерного пучка, линейно поляризованного (ЛинП) в плоскости X и имеющего высокоапертурное кольцевое сведение в пределах узкой секторальной области полярного угла θ, на рис. 2а показана форма рассчитанных численно функций рассеяния точки (кривые I_5) для двух сечений: по X координате и по Y координате. Как можно видеть, распределение по X координате (линия в виде точек) имеет выраженный провал в центре, при $X = 0$, и двугорбую форму основных максимумов. В то же время, распределение по Y координате (линия в виде точек и штрихов) характеризуется приближенно одинаковыми величинами интенсивностями центрального и двух первых побочных максимумов. Иными словами, данный вид функции рассеяния точки имеет вид двух близко расположенных и вытянутых сфокусированных пятен со сверхмалыми размерами. Такое свойство фокусирующей системы может найти свое применение на практике. В частности, это позволяет использовать данный режим фокусировки для дальнейшего совершенствования высокоразрешающей многопучковой прямой лазерной записи [3], с получением нанометрового разрешения. Для сравнения, на этом же рисунке показаны два сечения функции рассеяния точки (по X и Y координатам) для стандартного апланатического объектива (АО), имеющего ту же самую числовую апертуру и освещаемого тем же самым гауссовым пучком (кривые I_6), с линейной поляризацией и без кольцевого виньетирования. Как можно видеть, формы сечений данной функции рассеяния близки к исходной гауссовой форме, но отличаются по ширине распределения. Поперечные размеры данных функций (по уровню интенсивности 0,5 и координатам X, Y) приближенно в два раза превышают поперечный размер максимумов вышерассмотренной двугорбой кривой I_5.

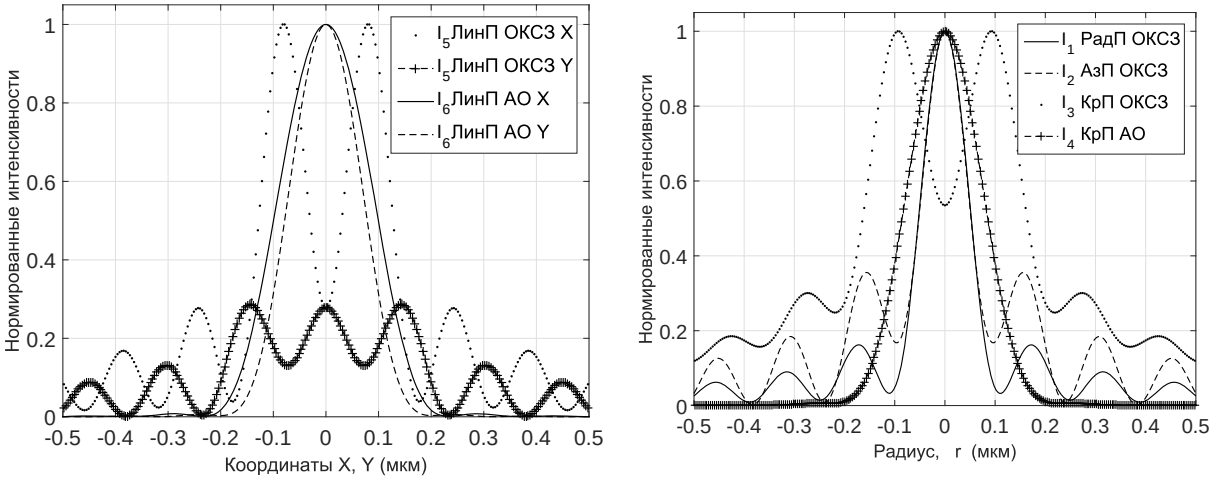


Рис. 2. Функции рассеяния точки обращенного кольцевого сферического зеркала (ОКСЗ) и апланатического объектива (АО) с равной числовой апертурой, для различных режимов поляризации входного пучка

На рис. 2б показана форма рассчитанных численно осесимметричных функций рассеяния точки для случая использования рассмотренного в данной работе обращенного кольцевого сферического зеркала и условия, когда входной пучок имеет высокоапертурное кольцевое сведение в пределах узкой секторальной области полярного угла θ, а также круговую (КрП, кривая I_3), азимутальную (АзП, кривая I_2), либо радиальную (РадП, кривая I_1) поляризацию. Как можно видеть, распределение, характерное для круговой поляризации, имеет относительно большие размеры и недостаточно глубокий провал в центре, для того, чтобы его можно было рекомендовать для практического применения. С другой стороны, распределения, характерные для азимутальной и радиальной поляризации, имеют выраженный центральный максимум, а также малые нанометровые поперечные размеры, что позволяет рассматривать их как приемлемые для различных практических применений. В частности, рассматриваемая оптическая система фокусировки может быть встроена систему прямой лазерной записи [4] для повышения разрешающей способности при записи структур, с использованием порогового механизма их записи. Для сравнения, на этом же рисунке показана функция рассеяния точки (кривая I_4) для стандартного апланатического объектива (АО), имеющего ту же самую числовую апертуру и освещаемого гауссовым пучком с указанным профилем, с круговой поляризацией (КрП) пучка без его кольцевого виньетирования. Как можно видеть, поперечный размер данной функции существенно превышает поперечные размеры, характерные для случаев использования сферического зеркала и радиальной либо азимутальной формах поляризации.

Таким образом, исследования типовых режимов поляризации лазерного пучка для рассмотренной оптической системы кольцевой фокусировки показали, что наибольший практический интерес представляют режимы поляризации с линейной, азимутальной и радиальной поляризациями. В частности, данные режимы могут найти применение для сверхразрешающей термохимической прямой записи, с применением сканирующего лазерного нанолитографа.

Данная работ поддержана частично грантом РФФИ ОФИ-М № 4-29-07227 и междисциплинарным интеграционным проектом № 112 Сибирского отделения РАН.

Источники

[1] Полещук А.Г. Оптимизация параметров высокоапертурного дифракционно-рефлекторного объектива / А.Г. Полещук и А.Г. Седухин // Сборник трудов 12-ой Международной конференции «Голография ЭКСПО 2015» (12–15 октября 2015 г., г. Казань, Россия). — М.: Изд-во ООО «Голография-Сервис», 2015. — С. 319–321.
[2] Richards B. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards and E. Wolf // Proc. R. Soc. London A. — 1959. — 253. — P. 358–379.
[3] Полещук А.Г. Многопучковая лазерная запись дифракционных оптических элементов / А.Г. Полещук, А.Р. Саметов, А.Г. Седухин // Автометрия. — 2012. — Том 48. — №4. — С. 3–11
[4] Полещук А.Г. Прецизионный лазерный технологический комплекс для производства шкал, сеток, фотошаблонов и синтезированных голограмм на основе лазерной трехмерной микро и нанообработки / А.Г. Полещук, В.П. Корольков, В.П. Бессмельцев, Ю.Н. Никаноров, А.Л. Карван, А.Г. Верхогляд // Тезисы доклада Международной конференции «Голоэкспо-2015». — Казань, 2015.

Diffractive-mirror high-numerical-aperture objective lens for focusing laser radiation in pattern generators

A.G. Poleshchuk, A.G. Sedukhin
Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

A new type of “dry” high aperture ($NA \approx 1$) mirror-diffractive objective lens is proposed and investigated. The objective lens has a large working distance (1 mm) and the internal transformation of the input radiation into a beam with annular aperture function. For radially polarized input radiation, the full width size of a laser spot evaluated at a half of central intensity maximum in the focal plane of the objective lens amounts to about 100 nm at the wavelength of 266 nm. The profile of the point spread function of the objective lens is close to the zero-order Bessel function of the first kind.

C4.10 Вращение микромеханических элементов в оптимизированных световых пучках на основе суперпозиций оптических вихрей

С.В. Ганчевская, Р.В. Скиданов
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия
Институт систем обработки изображений Российской академии наук — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Самара, Россия

Рассчитаны дифракционные оптические элементы, которые формируют некольцевые вихревые световые пучки с достаточно равномерным распределением интенсивности.

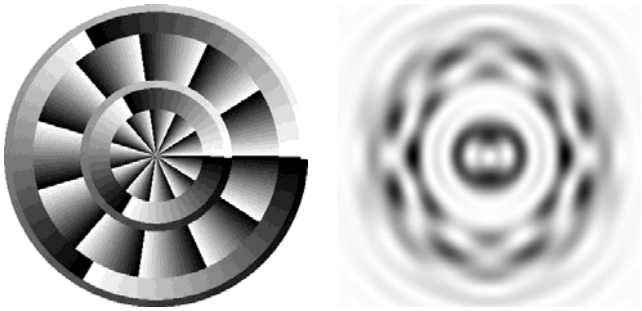
Для оптического вращения микрообъектов обычно используются вихревые световые пучки, имеющие четкую кольцевую структуру. Это могут быть пучки Бесселя [1], гипергеометрические пучки [2]. В качестве объектов для манипуляции выступают частицы с характерными размерами 0,1–10 мкм. Иногда в экспериментах используют объекты нанометровых размеров [3–6], в частности, частиц золота [4, 6].

Для вращения более крупных микрообъектов имеющих сложную форму и осевую симметрии, например, микротурбин требуется, обычно, больше усилий, чем для простого вращения микрообъектов. Значит, необходимо увеличить мощность и порядок рабочего вихревого пучка. Однако, простое повышение мощности в данном случае задачу не решает, т.к. возможно термическое разрушение микротурбины, т.к. в силу геометрии вихревого пучка вся его мощность будет сосредоточена в узкой области. Чтобы этого избежать необходимо минимизировать тепловое воздействие на микротурбину, т.е. сформировать световой пучок таким образом, чтобы световая мощность пучка была распределена по максимальной площади, а размер пучка был примерно сопоставим с размером микротурбины. Так же, чтобы вращающий момент от вихревого пучка эффективно передавался микротурбине, должно выполняться условие: силы, действующей на лопатку микротурбины при любой её ориентации одинакова, это достигается при условии равномерности распределения интенсивности по полярному углу [9].

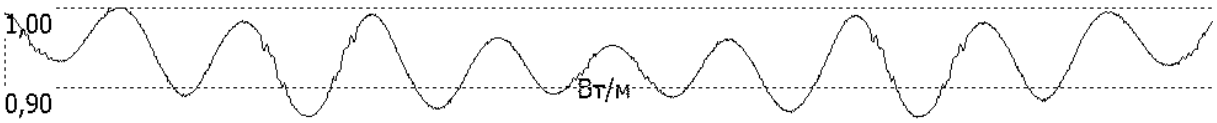
$$I_S(\varphi) = \int_0^R I(r,\varphi)dr \approx \text{const}, \tag{1}$$

где $I(r, \varphi)$ — интенсивность вихревого пучка в полярных координатах с центром на оси пучка, I_S — суммарная интенсивность пучка по текущему направлению.

Для формирования таких пучков были рассчитаны дифракционные оптические элементы, которые формируют изображения с практически равномерным распределением интенсивности.

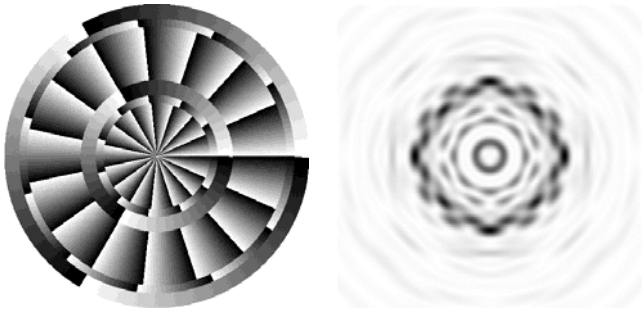


а) б)

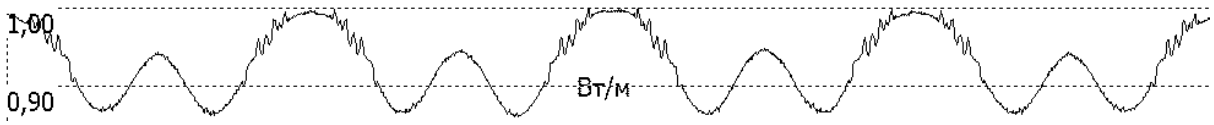


в)

Рис. 1. Фазовая функция ДОЭ для формирования суперпозиции световых пучков с топологическими зарядами 1, 3, 11 (а), распределение интенсивности пучка в дальней зоне дифракции (б), распределение интенсивности по полярному углу (в)



а) б)



в)

Рис. 2. Фазовая функция ДОЭ для формирования суперпозиции световых пучков пучка с топологическими зарядами 3, 11, 15 (а), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (б), распределение интенсивности по полярному углу (в)

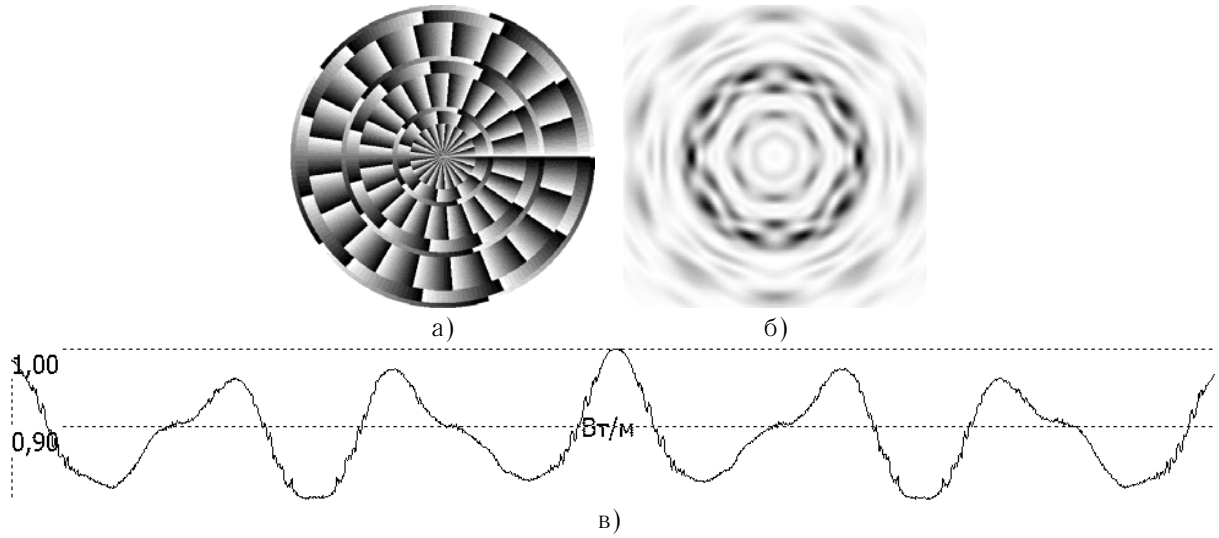


Рис. 3. Фазовая функция ДОЭ для формирования суперпозиции световых пучков пучка с топологическими зарядами 5, 11, 21 (а), распределение интенсивности пучка в дальней зоне дифракции (б), распределение интенсивности по полярному углу (в)

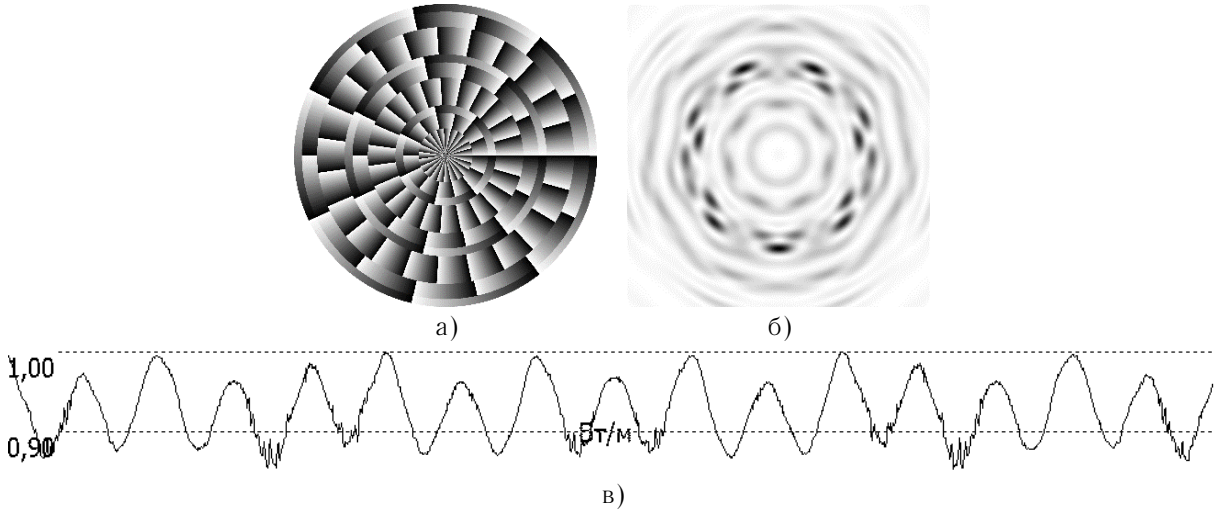


Рис. 4. Фазовая функция ДОЭ для формирования суперпозиции световых пучков пучка с топологическими зарядами 7, 14, 23 (а), распределение интенсивности пучка в дальней зоне дифракции (б), распределение интенсивности по полярному углу (в)

Как видно из рис. 1–4, формируемые распределения интенсивности некольцевые, однако распределение по полярному углу почти равномерное, что дает основание утверждать возможность использования таких световых пучков для оптического вращения микротурбин. На всех приведенных графиках относительно отклонение значения I_s от среднего значения не превышает 0,2.

Заключение

Рассчитаны дифракционные оптические элементы, формирующие некольцевые вихревые световые пучки с почти равномерным распределением интенсивности (относительное отклонение суммарной интенсивности пучка среднего значения не превышает 0,2).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 14-31-00014).

Источники

[1] Скиданов Р.В. Формирование пучков Бесселя вихревыми аксиконами / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // Компьютерная оптика. — 2014. — Том 38. — №3. — С. 463–468.
[2] Скиданов Р.В. Оптическое вращение микрочастиц в гипергеометрических пучках, сформированных дифракционными оптическими элементами с многоуровневым микрорельефом / Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина, А.А. Морозов // Оптический журнал. — 2013. — 80. — 10.
[3] Chen, Y.F. et al. Controlled photonic manipulation of proteins and other nanomaterials // Nano Lett. — 2012. — 12. — P. 1633–1637.
[4] Ploschner, M. Bidirectional optical sorting of gold nanoparticles / M. Ploschner, T. Cizmar, M. Mazilu, A. Di Falco, K. Dholakia // Nano Lett. — 2012. — 12. — P. 1923–1927.
[5] Demergis, V. & Florin, E-L. Ultrastrong optical binding of metallic nanoparticles // Nano Lett. — 2012. — 12. — P. 5756–5760.
[6] Messina, E. et al. Manipulation and Raman spectroscopy with optically trapped metal nanoparticles obtained by pulsed laser ablation in liquids // J. Phys. Chem. — 2011. — 115. — 5115–5122.
[7] Морозов, А.А. Сложные вихревые пучки для вращения микромеханических элементов / А.А. Морозов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. — 2013. — Том 37. — №1. — С. 68–75.

The rotation of the micromechanical elements in optimized light beams based on the superposition of optical vortices

S.V. Ganchevskaya, R.V. Skidanov
Image Processing Systems Institute — Branch of the Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia
Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

Designed diffractive optical elements forming a non-annular vortex light beams with fairly uniform intensity distribution.

C4.11 Использование магнитоплазмонных структур в устройствах считывания магнитной информации с документов

А.С. Кузнецов, Л.А. Найден, А.Ю. Жердев
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Интерес к поверхностным плазмон — поляритонным волнам связан с локализацией электромагнитного поля в малой приграничной области и возможностью его волноводного распространения [1].

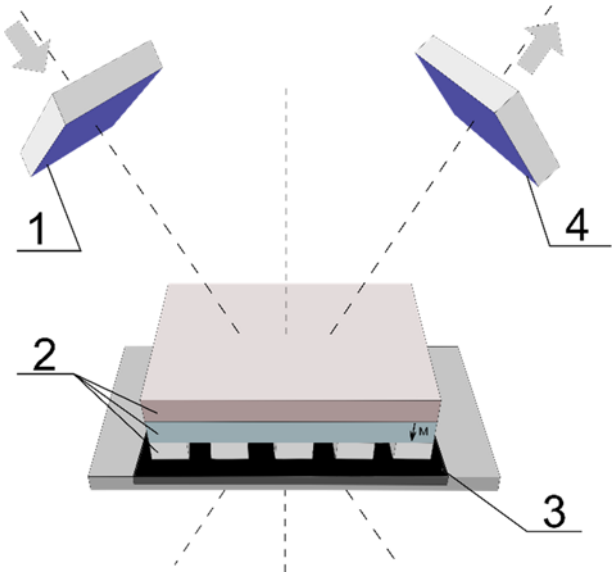
Среди различных оптических эффектов магнитооптические эффекты занимают одно из основных мест. Часто для практических целей оказывается важной возможность управлять оптическими свойствами используемых сред. Одним из наиболее эффективных методов является использование магнитных материалов [2]. Кроме очевидной возможности изменения оптических свойств среды под действием внешнего магнитного поля, это приводит к появлению целого ряда эффектов магнитооптики, обусловленных наличием намагниченности в среде.

Магнитооптические эффекты имеют наибольшую величину в ферромагнитных металлах, таких как железо, никель и кобальт. В то же время ферромагнитные металлы непрозрачны в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах и обладают значительными оптическими потерями. Поэтому большую значимость имеют ферромагнитные диэлектрики, обладающие несколько меньшей величиной магнитооптических эффектов, но в то же время существенно меньшим коэффициентом поглощения. Среди них, необходимо отметить висмут содержащие ферриты-гранаты.

Магнитооптические эффекты могут быть также усилены за счет возбуждения собственных волн структуры, в частности, в металло-диэлектрических структурах при возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). Поверхностные плазмон-поляритонные волны представляют собой связанные колебания электромагнитного поля и электронного газа металла, распространяющиеся вдоль границы раздела между металлом и диэлектриком. При этом электромагнитное поле волны локализовано вблизи границы между двумя средами.

Актуальной является задача разработки новых методов, а также аппаратуры для визуализации и регистрации скрытых магнитных структур с ценных документов, носителей аудио-видео записей или защитных голограмм с целью их контроля подлинности [6–10]. Среди существующих методов и устройств регистрации магнитных полей (датчики на эффекте Холла; визуализация и регистрация с помощью магнитных суспензий, методы магнитной силовой микроскопии), наиболее перспективными являются магнитооптические методы, и устройства на их основе [6–10]. Работа таких устройств основана на использовании магнитооптического эффекта Фарадея при прохождении излучения через намагниченную структуру.

В последнее время наибольший интерес наблюдается в области исследований резонансного усиления эффекта Фарадея в магнитных плазмонных структурах на основе золотых периодических решеток в слоях феррит-граната [11–13]. Целью данной работы является исследования путей повышения контраста изображения в устройствах считывания, и ее зависимости от геометрических параметров и материалов используемой магнитной плазмонной структуры. На рис. 1 представлена схема устройства регистрации и визуализации магнитной информации с ценных документов, с использованием магнитной плазмонной структуры.



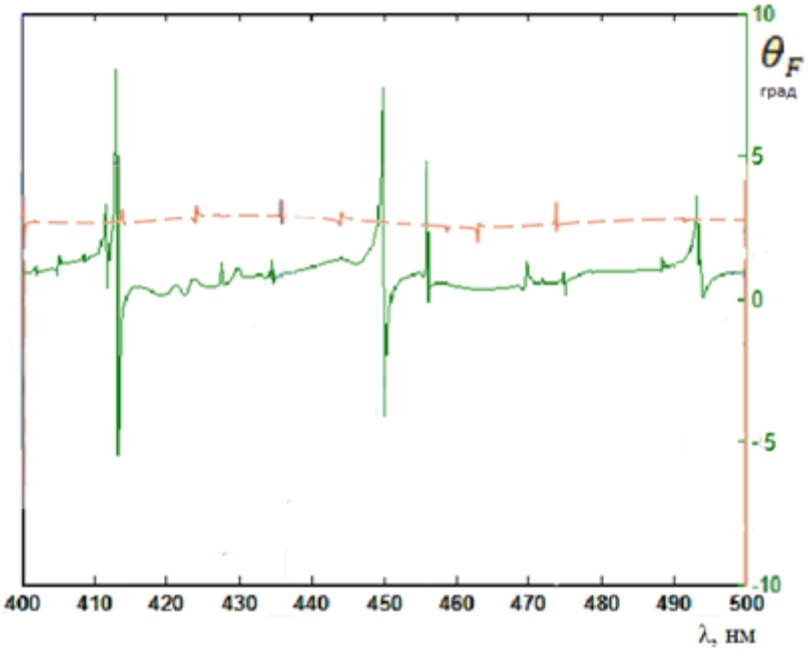
1 — поляризатор, 2 — магнитная плазмонная структура,
3 — ценный документ с носителем магнитной информации, 4 — анализатор
Рис. 1. Схема устройства регистрации и визуализации магнитной информации с использованием магнитной плазмонной структуры

В таких структурах наблюдаются резонансы в виде резких максимумов и минимумов в спектрах отражения и пропускания. Резонансы дифракционных структур обусловлены возбуждением собственных мод структуры. Модами периодической структуры могут быть квазиволноводные моды, распространяющиеся в направлении периодичности структуры, или локализованные моды (щелей и ступенек) структуры. Одним из наиболее универсальных методов расчета дифракции света на периодических структурах является метод фурье-мод. Данный метод основан на теореме Блоха — Флоке, из которой следует, что решение уравнений Максвелла в периодической структуре можно представить в виде квазипериодической функции. В рамках метода фурье-мод предполагается, что структура состоит из слоёв, в которых диэлектрическая проницаемость материалов не зависит от переменной z. В этом случае поле в каждом слое можно представить в виде ряда Фурье по переменной x, соответствующей направлению периодичности структуры, что показано на рис. 2.

Рис. 2. Схема периодической структуры

В ходе расчета задачи дифракции на периодических дифракционных структурах методом фурье-мод, были исследованы зависимости угла Фарадея от высоты слоя периодической решетки h_r, от ее периода d, от угла падения излучения α и высоты магнитооптического материала. Расчеты были проведены как для структур с одномерной периодической решеткой из благородного материала (золота), так и для однородных структур. Каждый из анализируемых параметров выбирался из начального диапазона: высота слоя периодической решетки от 50 до 100 нм; период структуры от 290 до 490 нм; угол падения от 30° до 60°; высота магнитооптического слоя от 470 до 670 нм. Далее рассматривались полученные результаты и путем перебора были подобраны оптимальные значения: h = 670 нм, $h_г$ = 100 нм, d = 390 нм,

$\alpha = 60^{\circ}$. На рис. 4 представлены результаты расчета с оптимальными параметрами для структуры без плазмонной решетки и структуры с плазмонной решеткой.



Штриховая линия — график структуры без плазмонной решетки,
сплошная линия — график для структуры с плазмонной решеткой
Рис. 5. Результирующий график для структур с плазмонной решеткой и без нее

Рис. 5 показывает, что в случае с плазмонной решетке график имеет резкие пики на нескольких длинах волн. Исходя из этого можно сказать, что наблюдается усиление магнитооптических эффектов в 2–3 раза в рассматриваемых магнитных плазмонных структурах, по сравнению с однородными пленками. Усиление магнитооптического эффекта в такой структуре объясняется возбуждением квазиволноводных мод.

Полученные результаты позволяют оценить в дальнейшем величину контраста изображения в оптических устройствах считывания скрытой магнитной информации с использованием одномерных магнитных плазмонных структур, чего до сих пор еще не было проанализировано и исследовано. В ходе проделанной работы были исследованы пути повышения контраста изображения в устройствах считывания, и зависимость структуры от геометрических параметров и материалов используемой магнитной плазмонной структуры. Наблюдаемые усиления в виде пиков позволили увеличить магнитооптические эффекты в 2–3 раза по сравнению со структурами без плазмонов. Данные результаты дают возможность судить об улучшении характеристик прибора в целом.

Источники

[1] Калиш А.Н. Магнитооптические эффекты в периодических наноструктурированных средах: дис. канд. физ-мат. наук. — М., 2013. — 167 с.
[2] Odinokov S.B. Optoelectronic Device for Reading of Hidden Magnetic Information from the Holograms / S.B. Odinokov, A.S. Kuznetsov, A.P. Gubarev // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2008. — Vol. 17. — №1. — P. 15–22.
[3] Одиноков С.Б. Исследование возможности магнитооптической регистрации магнитных сигналограмм формата записи типа VHS / С.Б. Одиноков, А.С. Кузнецов, А.В. Карев // Естественные и технические науки. — 2014. — №4. — С. 122–124.

[4] Кузнецов А.С. Оптико-электронный датчик магнитных полей сигналограмм ленточных носителей видеозаписи / А.С. Кузнецов, С.Б. Одиноков // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. — 2014. — №2-1. — С. 60—63.
[5] 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.
[6] 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. — 077401.

Using a magnetoplasmonic structures in reading devices of hidden magnetic information from valuable documents

A.S. Kuznetsov L.A., Naiden, A.Y. Zherdev
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Object of research are imaging system and recording media c magnetic elements. The possibility of using magnetoplasmons structures in the recording devices and magnetic imaging of hidden information from valuable documents. The effects of resonance amplification of the magneto-optical Faraday effect depending on geometrical parameters magnetoplasmons structure.

Стендовые доклады
Секция №5

Голографическая интерферометрия, голографическая память, оптико-голографическая обработка информации

Poster presentations
Section №5

C5.1 Система спекл-оптического контроля состояния силовых элементов конструкций машиностроения

А.Н. Малов, П.В. Павлов, А.В. Неупокоева
Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия
Иркутский государственный медицинский университет, Иркутск, Россия

Рассматриваются реализация и применения информационно-диагностического комплекса неразрушающего контроля, позволяющего проводить контроль технического состояния узлов и агрегатов с использованием метода анализа спекл-структур оптического излучения. Разработанный оригинальный программный комплекс реализует алгоритмы обработки цифровых изображений на основе методов корреляционного анализа и метода «шахматной доски».

Введение

Модернизация существующих, и разработка перспективных авиационных комплексов вооружения позволила расширить их диапазон применения, что непосредственно сказалось на увеличении нагрузок на все агрегаты воздушного судна в процессе эксплуатации. Одним из важных факторов, обусловливающих аварийность воздушных судов (ВС) государственной авиации РФ является несовершенство находящихся на вооружении строевых частей устройств неразрушающего контроля (НК).

Так, например, в основе стандартных дефектоскопических работ по осмотру поверхностей высоконагруженных деталей ВС лежит оптико-визуальный метод НК, следовательно, от его результатов будет зависеть дальнейшая безопасность полетов авиапарка ГА РФ. Основным недостатком такого оптического метода НК является влияние человеческого фактора на результат контроля и отсутствие возможности определения глубины повреждения (дефекта) детали. Таким образом, актуальна разработка новых, высокоточных устройств НК.

Наличие современной элементной базы оптоэлектроники — полупроводниковые лазеры, матричные фотоприемники, портативные компьютеры — позволило создать мобильный спекл-лазерный дефектоскоп [1]. Принцип работы данного устройства основан на использовании метода спекл-структур оптического излучения (МССОИ).

Физический смысл МССОИ состоит в следующем. Если освещать шероховатый предмет когерентным пучком излучения (лазером), то изображение, которое наблюдается, либо глазом, либо при помощи оптической системы, имеет ярко выраженную зернистую структуру – спекл-картину. Характер и структура спекл-картины полностью зависит от структуры облучаемой поверхности, поэтому при образовании мельчайшего дефекта (соизмеримого с длиной волны излучения) на контролируемой поверхности происходит изменение структуры спекл-изображений.

В настоящее время известен ряд областей, где применение МССОИ имеет большие перспективы: исследование материалов методом спекл-структур [2], исследование состояния организма [3], исследование деформаций и напряжений в деталях [4].

При использовании МССОИ применяются различные алгоритмы обработки цифровых спекл-изображений. В работах [5, 6] рассмотрены физические принципы алгоритмов и область их применения. Отсутствие специализированного программного комплекса, включающего в себя модули цифровой обработки изображений, не позволяло операторам, имеющим базовые навыки владения ЭВМ проводить операции по НК с применением устройств, принцип действия которых основан на использовании МССОИ.

Бурное развитие микроэлектроники привело к тому, что на сегодняшний момент каждый мобильный гаджет, является портативным вычислительным устройством, позволяющим производить серьезные математические вычисления, в том числе и выполнять операции по цифровой обработке изображений. Использование программного комплекса на портативных вычислителях, работающих на операционных системах (ОС) Android, Mac OS, Linux, Windows Phone, требует от разработчиков выбора кроссплатформенного языка программирования, позволяющего создавать ПО, совместимое с любой из рассмотренных выше ОС. Поэтому в качестве инструмента был выбран язык программирования Java SE, со средой разработки Eclipse.

Цель настоящей работы заключалась в разработке программного комплекса, способного расширить возможность устройств НК, принцип действия которых основан на использовании МССОИ, за счет оптимизации алгоритмов обработки цифровых спекл-изображений, увеличения эргономики среды обработки и выполнении комплексной оценки параметров контролируемых деталей по анализу параметров цифровых спекл-изображений.

1. Методы обработки цифровых спекл-изображений

1.1 Корреляционная обработка спекл-изображений

Для извлечения полезной информации из спекл-изображений известны различные методы их цифровой обработки. Одним из таких методов является корреляционный анализ, который позволяет по ширине функции автокорреляции определить наличие дефекта на контролируемой поверхности [7].

Принцип работы алгоритма корреляционного метода состоит в циклическом сдвиге исходного спекл-изображения, относительно самого себя по оси координат OX, или OY, на шаг смещения равный одному пикселю. При каждом таком смещении рассчитывается коэффициент автокорреляции исходного изображения и смещенного по формуле (1), после выполнения всех сдвигов получается множество коэффициентов автокорреляции со значениями, изменяющимися от 1, что свидетельствует о полном сходстве обрабатываемых изображений при шаге смещения равным нулю, и до 0, что говорит о полном различии исходного и смещенного изображений. На завершающем этапе работы метода, строится график автокорреляционной функции (рис. 1) из рассчитанного множества коэффициентов автокорреляции:

$$r_\tau = \frac{(n-\tau)\sum_{t=1}^{n-\tau} x_t x_{t+\tau} - \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t \sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau}}{\sqrt{(n-\tau)\sum_{t=1}^{n-\tau} x_t^2 - \left(\sum_{t=1}^{n-\tau} x_t\right)^2}\sqrt{(n-\tau)\sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau}^2 - \left(\sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau}\right)^2}}, \quad (1)$$

где x_t — значение яркости пикселя в точке t; $x_{t+\tau}$ — значение яркости пикселя в точке t, в момент смещения τ; n — количество пикселей, τ — шаг смещения. Количество смещений соответствует размеру спекл-изображения, ширине в случае если производится смещение вдоль оси OX, и высоте в случае смещения по оси OY.

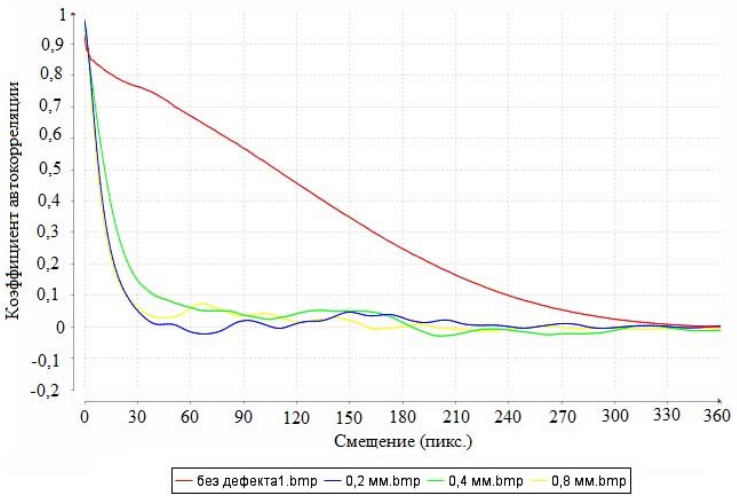


Рис. 1. Графики функций автокорреляции спекл-изображений

Данный метод позволяет в режиме реального времени проводить анализ параметров поверхности деталей, изготовленных из различных материалов, путем сопоставления рассчитанных характеристик с эталонными значениями, полученными в тот момент времени, когда поверхность детали не имела дефектов.

1.2 Метод «шахматной доски»

Метод «шахматной доски» позволяет отслеживать динамику изменения параметров дефекта, путем временного анализа параметров шероховатости исследуемой поверхности.

Метод «шахматной доски» позволяет выявить корреляцию элементов (спекл-пятен) изображения с элементами (клетками) шахматной доски. Для простой модели одномерного случая можно определить:

$$t(p) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \mathrm{rect}\left(\frac{x}{d_{\text{СП}}} + n d_{\text{СП}}\right), \tag{2}$$

$$t(d) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_m \,\mathrm{rect}\left(\frac{x}{d_{\text{Ш}}} + m d_{\text{Ш}}\right), \tag{3}$$

где $t(p)$ — распределение яркостей пикселей спекл-изображения, $t(d)$ — распределение яркостей пикселей по шахматной доске, $a_m = 0$, при четном $md_{\text{сп}}$ — размер спекл-пятна, $d_{\text{ш}}$ — размер клетки шахматной доски, $\mathrm{rect}(x)$ — прямоугольная функция.

$$\mathrm{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \le \dfrac{1}{2}, \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Уравнение (2) предполагает, что изображение состоит из одинаковых по размеру спекл-пятен (или их подавляющее большинство).

Для обработки непрерывного распределения яркостей изображений, описываемых уравнений (2) и (3) необходимо произвести их дискретизацию, для этого используется гребенка Дирака [8], и в результате получается:

$$t(p) = \mathrm{rect}\left(\frac{x}{d_{\text{СП}}}\right) \otimes \mathrm{comb}\left(\frac{x}{d_{\text{СП}}}\right), \tag{4}$$

$$t(d) = \mathrm{rect}\left(\frac{x}{d_{\text{Ш}}}\right) \otimes \mathrm{comb}\left(\frac{x}{d_{\text{Ш}}}\right), \tag{5}$$

где $\otimes$ — знак операции свертки, $\mathrm{comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x-n)$ — гребенка Дирака.

Для нахождения Фурье-спектра дискретных функций (4) и (5), выполняется прямое Фурье-преобразование, в результате которого получается:

$$\tilde{F}\{t(p)\} = \mathrm{sinc}(f_x d_{\text{СП}})\mathrm{comb}(f_x d_{\text{СП}}), \tag{6}$$

$$\tilde{F}\{t(d)\} = \mathrm{sinc}(f_x d_{\text{Ш}})\mathrm{comb}(f_x d_{\text{Ш}}), \tag{7}$$

После получения Фурье-спектров (7), (8) необходимо их перемножить, а затем выполнить обратное Фурье-преобразование, в результате которого получается функция корреляции спекл-изображения и шахматной доски.

В случае если, $d_{\text{ш}} = d_{\text{сп}}$ то при перемножении спектров (6), (7) появляются слагаемые вида $\mathrm{sinc}^2(f_x d_{\text{ш}})$, обратное преобразование Фурье которых равно $\mathrm{rect}^2\left(\frac{x}{d_{\text{Ш}}}\right)$, что есть треугольная функция $\Lambda(x)$

$$\Lambda(x) = \begin{cases} 1-|x|, & |x| \le 1, \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

В двумерном случае результатом будет структура типа пирамиды в пределах одной клетки шахматной доски. При наличии достаточно большого количества спекл-пятен примерно одинакового размера, будет возникать структура шахматной доски с элементами в виде таких пирамид (рис. 2).

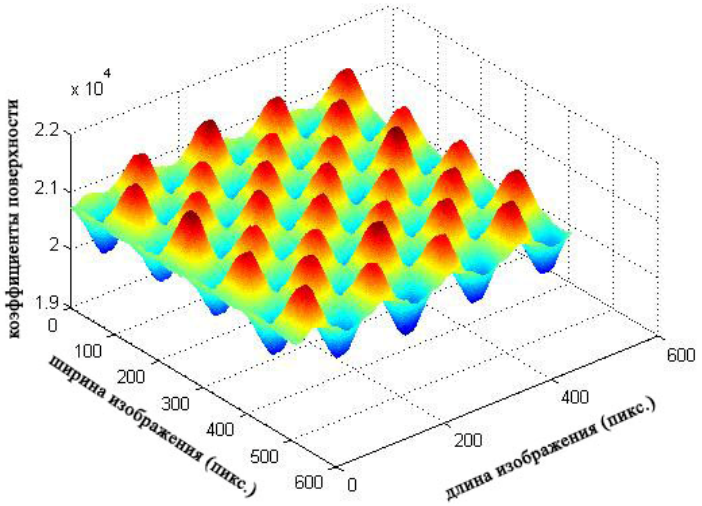


Рис. 2. Результирующее изображение корреляционной функции по алгоритму «шахматной доски»

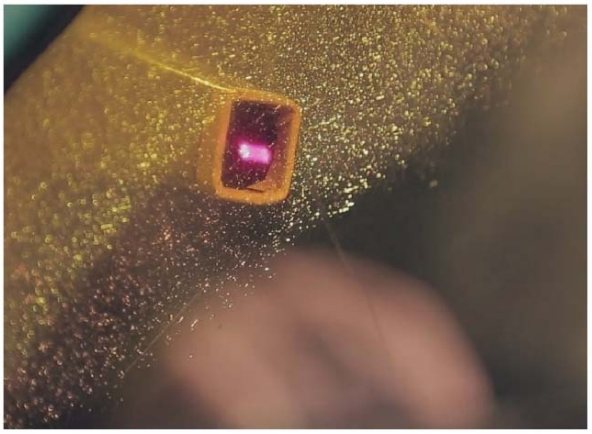
В случае если $d_{\text{ш}} > d_{\text{сп}}$ или $d_{\text{ш}} < d_{\text{сп}}$, то при перемножении спектров (6), (7) структура корреляционной функции с «шахматной доской» будет неравномерной и начнет преобразовываться в цепочку, что будет свидетельствовать об изменении размеров спеклов, а значит и об изменении величины степени шероховатости поверхности в большую или в меньшую сторону относительно размера клеток шахматной доски.

2. Пример работы системы неразрушающего контроля

2.1 Пример работы программного модуля корреляционной обработки спекл-изображений

Разработанный программный комплекс позволяет производить контроль технического состояния поверхностей, изготовленных из различных материалов.

Для демонстрации работы комплекса был выбран фонарь кабины самолета МиГ-31, на его поверхности были обнаружены микротрещины, которые и стали объектами для исследований. Диагностика остекления фонаря кабины самолета производится в несколько этапов. На первом этапе проводится визуальный осмотр всего фонаря кабины самолёта, и выявляются очаги образования микротрещин («серебро») (рис. 3а). На следующем этапе проводится сканирование обнаруженных очагов образования микротрещин с помощью лазерного спекл-дефектоскопа (рис. 3б). После завершения сканирования полученные спекл-изображения передаются в разработанный программный комплекс, в котором производится их обработка и автоматически делается вывод о наличии дефекта на исследуемой поверхности, с использованием автокорреляционного метода обработки спекл-изображений.



а)

б)

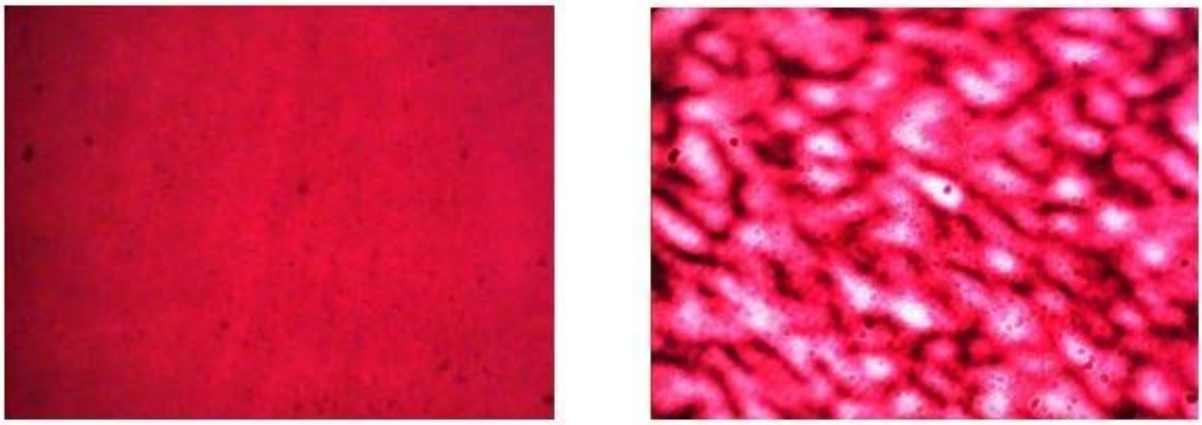
Рис. 3. а — Фрагмент элемента остекления боевого воздушного судна с цепочкой повреждений типа «серебро», б — практическое применение аппаратно-программного комплекса НК (в конусе размещаются освещающий полупроводниковый лазер и фотоприемная матрица)

Во время эксперимента были получены несколько спекл-изображений с поверхности фонаря самолета МиГ-31 без дефектов (рис. 4а) и с наличием микротрещин (рис. 4б).

Методом автокорреляционного анализа были получены результаты отображенные в табл. 1.

Табл. 1. Рассчитанные характеристики экспериментальных спекл-изображений

Имя изображения	Интервал автокорреляции	Ширина энергетического спектра
Без дефекта	51,497	1,233
С дефектом	15,617	2,214



а) без дефектов б) при наличии микротрещин («серебро»)

Рис. 4. Спекл-изображения поверхности фонаря самолета МиГ-31

Из табл. 1 видно, что интервал функции автокорреляции изображения с наличием микротрещин значительно уменьшился, по сравнению с изображением без дефектов, что наглядно видно на графике автокорреляционной функции (рис. 5).

На основе полученных данных программа автоматически делает вывод о наличии или отсутствии на поверхности микротрещин.

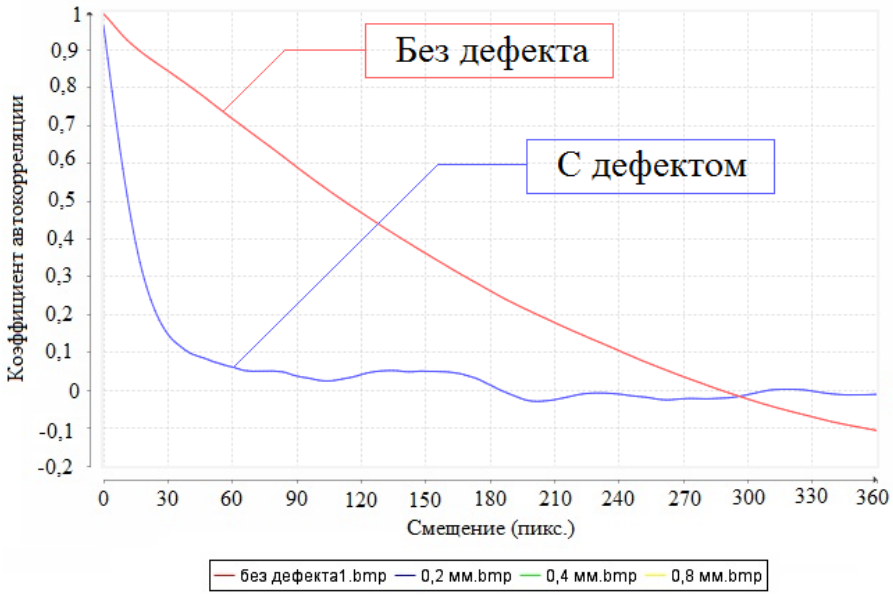


Рис. 5. График функций автокорреляций регистрируемых спекл-изображений

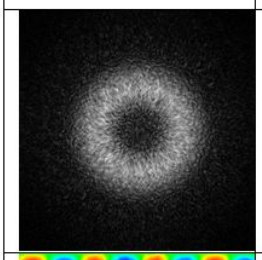
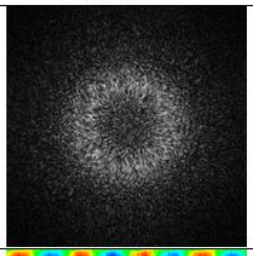
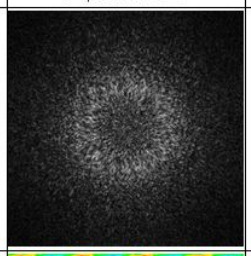
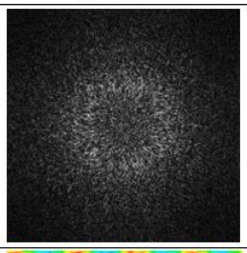
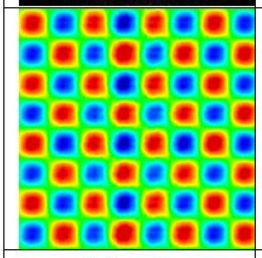
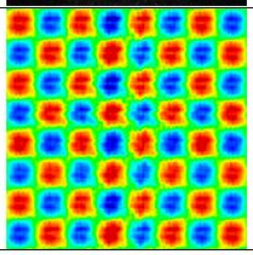
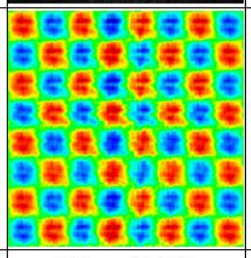
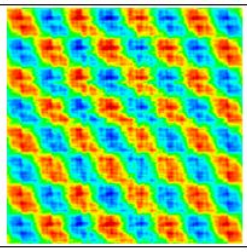
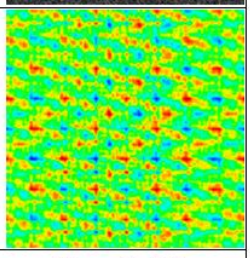
2.2 Пример работы модуля анализа спекл-изображений по алгоритму «шахматной доски»

Применение метода «шахматной доски» при обработке спекл-изображений в большой мере сводится к отслеживанию изменения параметров дефекта во время эксплуатации воздушного судна, поэтому для демонстрации работы метода был смоделирован жизненный цикл детали, от её начальных значений параметров шероховатости до появления микротрещин

на её поверхности. Были сформированы соответственно спекл-изображения с разрешением 512×512 пикселей (табл. 2, верхний ряд) путем зондирования контролируемого участка детали когерентным излучением с длиной волны 650 нм, через 5, 10, 15, 30 и 45 тысяч циклов на кручение и изгиб, при этом параметры шероховатости поверхности менялись от 0,1 мкм до 1,3 мкм (табл. 2, средний ряд).

Для анализа изменения параметров шероховатости поверхности детали с увеличением количества циклов испытаний *N*, регистрируемые спекл-картины обрабатывались методом «шахматной доски». В начале работы алгоритма была найдена четкая регулярная структура типа набора «пирамидок» для начального изображения, путем корреляции спекл-изображения с «шахматными досками» различных размеров от 5×5 до 100×100 пикселей с шагом 5 пикселей, пока не получится наиболее четко выраженная структура типа рис. 2а затем с таким же размером «шахматной доски» были проанализированы и остальные спекл-изображения. Затем рассчитывался коэффициент корреляции начального изображения с каждым из последующих, что представлено в табл. 2 в нижнем ряду вместе с полученными изображениями со структурой типа «шахматная доска».

Табл. 2. Результаты эксперимента
верхний ряд — смоделированные спекл-изображения,
средний ряд — обработанные методом «шахматной доски»,
нижний ряд — коэффициент корреляции эталонного изображения с исследуемыми

эталон	5 тыс. циклов	15 тыс. циклов	30 тыс. циклов	45 тыс. циклов
				
				
K= 1	K = 0,944	K = 0,87	K = 0,5	K = 0,03

По результатам испытания программного модуля установлено, что с увеличением количества циклов испытаний величина высотного параметра шероховатости *Ra* возрастает, что ведет к нарушению регулярной структуры типа «шахматная доска» (начинает преобразовываться в цепочку), что, в свою очередь, ведет к уменьшению коэффициента корреляции с 1 до 0,5. При этом на поверхности детали начинают наблюдаться микротрещины, которые через 15 тыс. циклов работы приводят к образованию трещины, и в результате происходит полное разрушение регулярной структуры (крайнее нижнее правое изображение в табл. 2).

График зависимости коэффициента корреляции от начального до значения, при котором возникает разрушение структуры контролируемого образца, представлен на рис. 6.

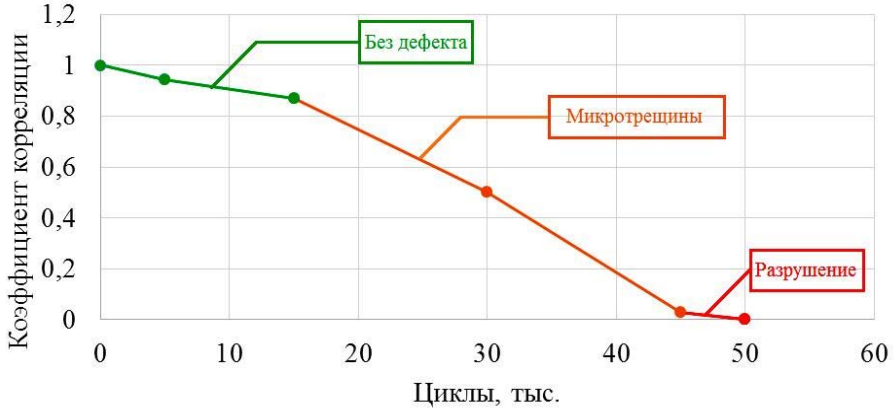


Рис. 6. Результаты эксперимента

Заключение

Таким образом, внедрение разработанного информационно-диагностического комплекса позволит проводить дефектоскопический контроль узлов и агрегатов воздушного судна, по анализу параметров цифровых спекл-изображений с использованием базы данных эталонных значений повреждений, а также отслеживать динамику изменения параметров дефектов и определять остаточный ресурс силовых элементов конструкции в процессе эксплуатации воздушного судна. Преимуществом данного комплекса является его мобильность, возможность производить технический контроль инженерно-техническим составом, имеющим базовые навыки владения компьютером, отсутствие влияния человеческого фактора на конечный результат контроля, что позволит уменьшить ошибку при диагностике силовых элементов конструкции воздушного судна.

Источники

[1] Патент на полезную модель №112991 РФ. Устройство бесконтактного определения шероховатости / П.В. Павлов, А.Н. Малов, А.Н. Бородин, И.Э. Вольф, А.Н. Онацкий, А.В. Сычевский. — 25.06.2010, опубл. 27.01.2012, Бюл. №3.

[2] Колесов С.С. Метод спекл-структур для диагностики поверхностей деталей / С.С. Колесов, П.В. Павлов, А.Н. Малов // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. — М.: НИЯИУ МИФИ, 2014. — С. 273–274.

[3] Malov A.N. The laser radiation action on the biological objects / A.N. Malov, A.Yu. Seteikin, A.V. Neupokoeva, E.S. Musatova, I.E. Golub, L.V. Sorokina, V.S. Fetschenko, A.A. Vaichas // Optik. — 2013. — 124. — P. 6034–6041.

[4] Джоунс Р. Голографическая и спекл-интерферометрия / Р. Джоунс, К. Уайкс. — М.: Мир, 1986. — 328 с.

[5] Павлов П.В. Новый подход в определении параметров поверхностей деталей с использованием метода спекл-структур и вихревых лазерных пучков / П.В. Павлов, И.Э. Вольф, А.Н. Малов, Н.В. Петров // Насосы. Турбины. Системы. — 2013. — №3. — С. 62–70.

[6] Малов А.Н. Метод «шахматной доски» для анализа спекл-изображений / А.Н. Малов, А.В. Неупокоева // Сборник трудов 10-й Международной конференции «ГолоЭкспо-2013», 17–18 сентября 2013 г., Москва. — С. 20–27.

[7] Павлов П.В. Определение параметров шероховатости и дефектация поверхностей деталей воздушного судна с применением спиральных пучков лазерного излучения / П.В. Павлов, Н.В. Петров, А.Н. Малов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2011. — №6 (76). — С. 84–88.

[8] Гудмен Дж. Статистическая оптика. // Гудмен Дж. — М.: Мир, 1988. — 528 с.

The speckle-optical system of a mechanical engineering designs power elements status control

A.N. Malov, P.V. Pavlov, A.V. Neupokoeva
Engineering Training and Research Air Force Center "Air Force Academy named after professor N.E. Zhukuvsky and Y.A. Gagarin", Voronezh, Russia
Irkutsk State Medical University, Irkutsk, Russia

Are considered realization and applications of an information-diagnostic complex of not destructs testing, allowing to carry out the control of a technical status of sites and units with use of a method of the analysis of laser speckle-image structures. The developed original program complex realizes algorithms of digital images processing on the basis of methods of the correlation analysis and a "chessboard" method.

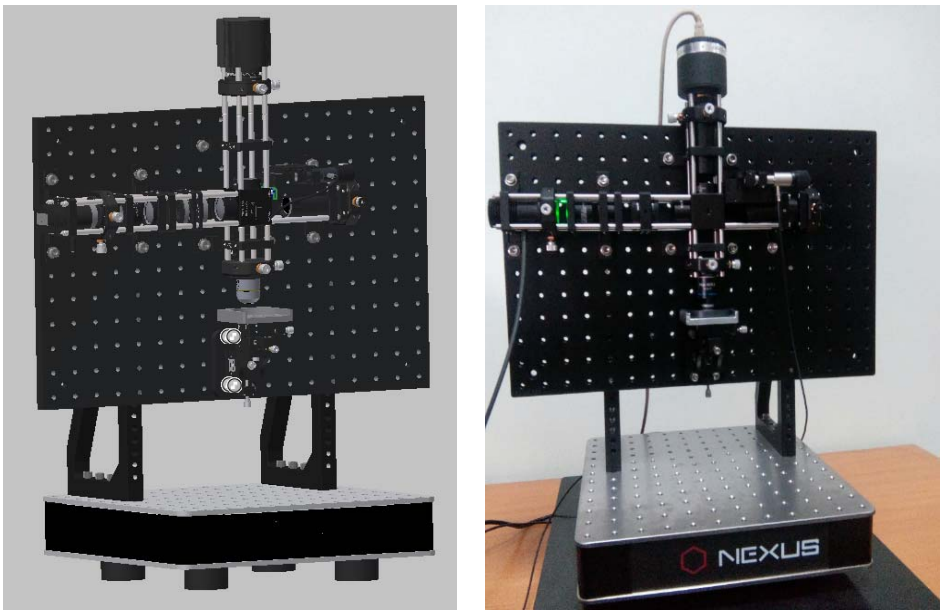
C5.2 Интерференционный микроскоп Линника с супергладким опорным зеркалом

В.Л. Минаев, Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия

Важной задачей современной метрологии является измерение формы супергладких поверхностей, шероховатости которых достигает 1 Å. К таким поверхностям относят лазерные зеркала, подложки из ситалла, карбида кремния и других материалов, используемых для многослойной рентгеновской оптики и пр. Для решения этой задачи существуют различные методы измерения: малоугловая рентгеновской рефлектометрия [1], атомно-силовая микроскопия [1], лазерная интерференционная микроскопия [2], сканирующая интерференционная микроскопия белого света [3]. Ранее нами был описан модернизированный микроскоп Линника с осветителем белого света, построенный на базе серийно выпускаемого микроскопа МИИ-4М (ЛОМО) [4]. Однако в процессе его эксплуатации были выявлены недостатки, ограничивающие его применение для исследования супергладких поверхностей. Фазовый сдвиг осуществляется за счет перемещения опорного зеркала, оно перемещается независимо от микрообъектива в результате чего происходит дефокусировка опорного зеркала и повышается погрешность. Фокусировка на объект производится за счет перемещения интерферометра, что приводит к дефокусировки объекта в процессе длительных измерений. Разрядность оцифровки камеры 8 бит, частота захвата кадров 7 к/с, нет биннинга при съемке, что увеличивает фотометрические шумы. Также зеркало опорного канала имеет шероховатость 8 Å, которая сравнима с шероховатостью исследуемых поверхностей и в процессе измерения эта шероховатость складывается с шероховатостью измеряемой поверхности.

Для преодоления этих недостатков нами был разработан прямой микроскоп по схеме Линника (рис. 1). Главной особенность разработанного микроскопа является то, что в качестве опорного зеркала в нем использовано супергладкое зеркало, представляющее собой моноатомный слой кремния. Диаметр зеркала составляет 200 мкм, а его шероховатость 0,05 нм. Такие зеркала изготавливаются по специальной запатентованной технологии Институтом физики полупроводников (ИФП) им. А.В. Ржанова СО РАН [5].

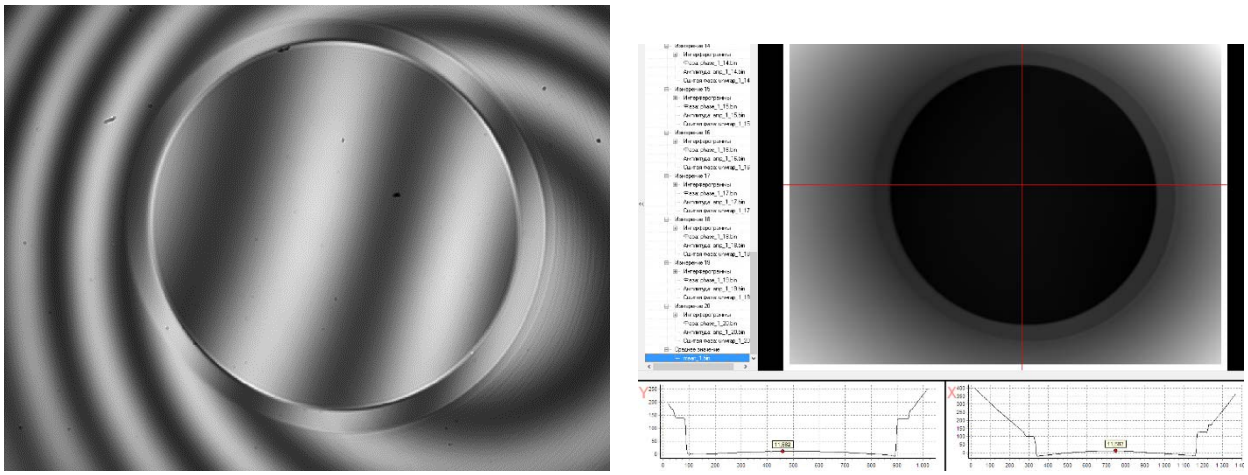
Фазовый сдвиг в микроскопе осуществляется за счет перемещения микрообъектива и опорного зеркала, которые представляют собой единый узел, размещенный на пьезоприводе. Этот узел является сменным, как и предметный микрообъектив, что, в отличие от микроскопа МИИ-4М, позволяет менять микрообъективы. Для настройки на опорное зеркало использован трехосевой позиционер, позволяющий фокусироваться на супергладкое зеркало и устанавливать его в центр поля зрения. Для повышения точности измерения использован пьезопривод с обратной связью, позволяющий с погрешность 2 нм устанавливать фазовые шаги. Микроскоп имеет вертикальную компоновку. Для защиты от вибраций интерферометр жестко закреплен с помощью кронштейнов на несущей вертикальной плите относительно подвижного предметного столика, установленного на той же плите.



а) б)

Рис. 1. Аксонометрический вид микроскопа (CAD модель) (а), фото микроскопа (б)

Проведенные ранее численные и экспериментальные исследования [6, 7] показали, что для повышения точности измерения необходимо уменьшать шумы дискретизации, фотометрические и фазовые шумы. Для уменьшения шумов дискретизации необходимо повышать разрядность оцифровки изображения. Поэтому в микроскопе использована камера с разрядностью оцифровки 14 бит и с частотой захвата 30 кадров/с. Для уменьшения фотометрических шумов камера работает в режиме биннинга, позволяющего на аппаратном уровне объединять пикселы. Это повышает чувствительность камеры и снижает фотометрический шум. Для дополнительного уменьшения фотометрического шума используется усреднение по кадрам. Фазовые шумы уменьшаются за счет усреднения по измерениям [6]. На рис. 2 представлены результаты измерений супергладкого зеркала ИФП СО РАН.



а) интерферограмма зеркала б) фазовое изображение

Рис. 2. Результаты измерения супергладкого зеркала ИФП СО РАН

Источники

[1] Барышева М.М. Особенности изучения шероховатости подложек для многослойной рентгеновской оптики методами малоугловой рентгеновской рефлектометрии, атомно-силовой и интерференционной микроскопии / М.М. Барышева, Ю.А. Вайнер и др. // Известия РАН. Серия физическая. — 2011. — Том 75. — №1. — С. 71–76.

[2] Минаев В.Л. Автоматизированный интерференционный микроскоп / В.Л. Минаев, Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин // Тез. докл. Научно-практическая конференция «Голография в России и за рубежом. Наука и практика». — М., 2005. — С. 71.

[3] Вишняков Г.Н. Применение интерферометра «белого света» для измерения профиля и шероховатости оптических деталей / Г.Н. Вишняков, Э.Ю. Левина, В.Л. Минаев, Н.Н. Моисеев, И.Ю. Цельмина // Тез. докл. Научно-практическая конференция «Голография в России и за рубежом. Наука и практика». — М., 2009.

[4] Вишняков Г.Н. Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине / Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин, В.Л. Минаев, И.Ю. Цельмина // Сборник трудов и официальные материалы научно-практической конференции «Голография. Наука и практика». — М., 2013

[5] Патент №2371674 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. — 27.10.2009.

[6] 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.

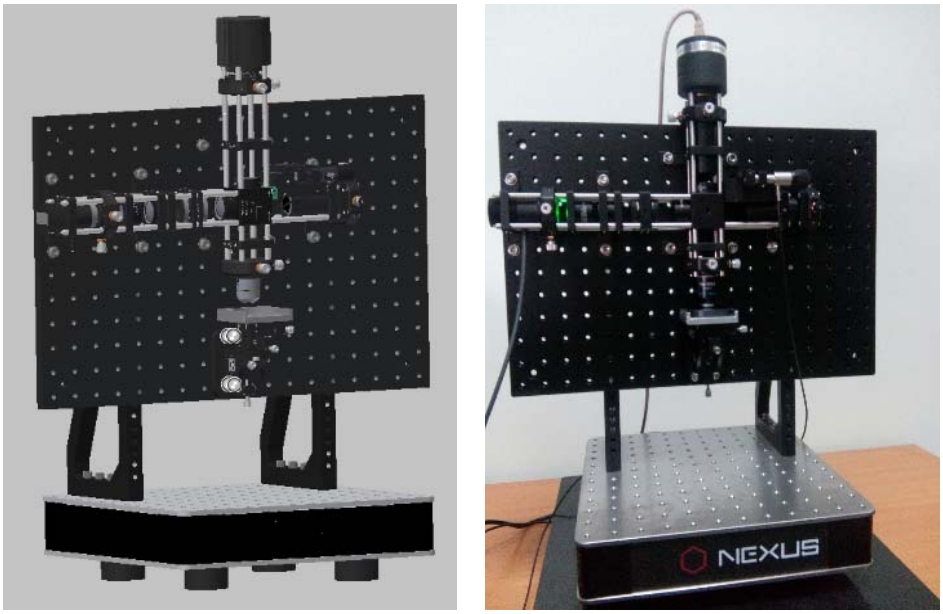
[7] Вишняков Г.Н. Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине. Экспериментальные исследования / Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин, В.Л. Минаев, И.Ю. Цельмина // Оптика и спектроскопия. — 2013. — Том 116. — №1. — С. 170.

Linnik interference microscope with a super-smooth mirror support

V.L. Minaev G.N. Vishnyakov G.G. Levin
FSUE "Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements", Moscow, Russia

One of the tasks of the modern metrology is measurement of the form of super-smooth surfaces which roughness reaches 1Å. Formerly we described the interference Linnik type microscope with white light source based on commercial inverted microscope MII-4M (LOMO). However, we found disadvantages restricting its using for the measurements of the super-smooth surfaces.

For negotiation of the disadvantages we developed upright Linnik type microscope (Fig. 1). The main feature of the developed microscope is the reference super-smooth mirror. This mirror is monolayer silica surface. Diameter of the mirror is about 200 μm and roughness is 0.05 nm. Such mirrors are produced by Rzhanov Institute of Semiconductor Physics (SB RAS) using patented process.



a) b)

Fig. 1. CAD model of the microscope (a), photo of the microscope (b)

C5.3 Оптимизация лазерно-компьютерной системы для получения спекл-интерферограмм форм колебаний цилиндрических оболочек

В.И. Шанин
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Успех использования электронной спекл-интерферометрии для оценки малых деформаций и смещений, также поведения различных поверхностей по причине воздействия на них вибраций всецело зависит от выполнения ряда условий при создании спекл-интерферометра. Такими условиями являются:

- одновременное получение информации о всей исследуемой поверхности;
- построение схемы и создание конструкции интерферометра в соответствии с особенностями исследуемого изделия;
- формирование спекл-интерферограммы высокого качества, которое связано с оптимальным отношением сигнал/шум;
- снижение требований к точности юстировки оптических элементов.

В данной работе рассматривается электронный спекл-интерферометр для исследования форм собственных колебаний цилиндрических оболочек с учетом выше перечисленных условий.

В соответствии с особеностями конструкции и физики работы цилиндрической оболочки была создана экспериментальная установка. Ее основу составляет интерферометр Майкельсона.

Установка состоит из полупроводникового лазера; коллиматора, содержащего диффузный рассеиватель; полупрозрачного зеркала; узла для крепления цилиндрической оболочки; отражающего зеркала; видеокамеры; персонального компьютера и генератора звуковых частот.

Первое плечо интерферометра Майкельсона представляют оптические элементы: коллиматор, полупрозрачное зеркало и узел крепления цилиндрической оболочки. Узел для крепления цилиндрической оболочки представляет собой вогнутое коническое зеркало с углом раскрыва 90°, в центре которого по оси располагается цилиндрическая оболочка. В результате такой конструкции зеркала появилась возможность одновременно наблюдать поведение всей поверхности оболочки при ее возбуждении от генератора звуковых частот.

Второе плечо интерферометра, являющееся формирователем опорного пучка света, состоит из отражающего зеркала, упомянутого полупрозрачного зеркала и на его выходе стоящей видеосистемы. Для регистрации спеклового изображения нами в качестве видеосистемы использовалась высокоразрешающая цифровая камера типа «Canon». Спекловые изображения в цифровой форме поступают на вход персонального компьютера, где они программно обрабатываюся и в результате формируется в памяти компьютера спекл-интерферограмма форм собственныхколебания цилиндрической оболочки. Для реализации процесса формирования интерферограмм нами было разработано программное обеспечение на базе пакета MATLAB.

Такое построение спекл-интерферометра позволило существенно упростить оптическую схему, конструкцию прибора, выбор оптических элементов, юстировку интерферометра и достигнуть оптимального отношения сигнал/шум.

Полученные экспериментальные результаты подтвердили правильность предложенного подхода при создании систем контроля и измерения на базе электронной спекл-интерферометрии.

Optimization of the laser-computer system to obtain a speckle interferogram forms cylindrical shell vibrations

V.I. Shanin
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

C5.4 Формирование, анализ и классификация гиперспектральных изображений

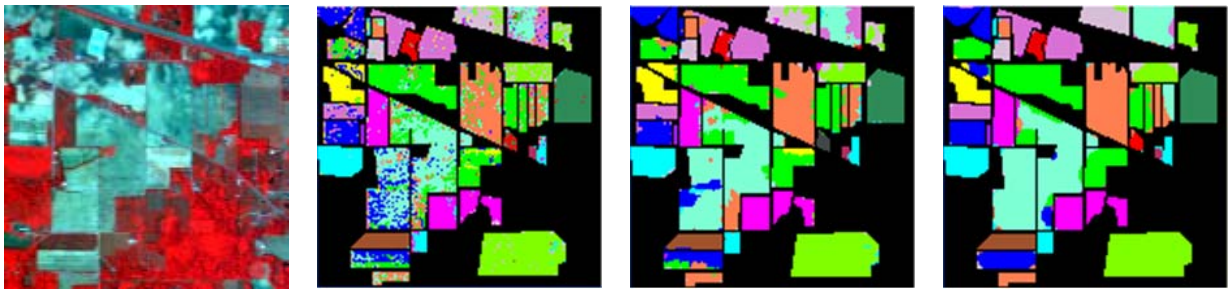
О.И. Потатуркин[1, 2], С.М. Борзов[1]
[1] Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия
[2] Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Проанализированы возможности и ограничения применения гиперспектральных изображений (ГСИ) при мониторинге поверхности Земли и околоземного пространства. Представлены результаты исследования методов классификации типов растительного покрова, основанных на сравнении спектров отражения исследуемых и эталонных объектов различных классов. Оценка эффективности методов выполнена на основе сопоставления результатов обработки реальных данных дистанционного зондирования Земли и карты наземных (подспутниковых) наблюдений.

В результате исследований влияния атмосферы на спектральные характеристики подстилающей поверхности показана важность предварительной калибровки ГСИ для их последующей классификации. Отмечено, что повышение эффективности обнаружения объектов по ГСИ (в сравнении с обработкой мультиспектральных данных ДЗЗ) основано на возможности формирования принципиально новых признаков, в т.ч. узкополосных спектральных индексов. Так ГСИ позволяют с высокой точностью определять положение красной границы полосы поглощения и, как следствие, эффективно различать состояние растительности.

Выполнены сравнительные исследования эффективности методов классификации ГСИ различных типов подстилающей поверхности. Установлено, что для эффективной обработки изображений природных и антропогенных территорий недостаточно методов, основанных на сравнении с эталонными спектрами, а необходимо также учитывать распределение данных в пространстве признаков. При обработке тестовых изображений природной зоны и городской застройки показано, что сокращение количества спектральных признаков методом главных компонент (до 15–20 для природной зоны и 5–10 для городской застройки) позволяет уменьшить трудоемкость обработки на два порядка, без существенного снижения эффективности классификации.

Исследована эффективность методов спектрально-пространственной классификации ГСИ, основанных на предварительном медианном сглаживании обрабатываемых изображений и на постобработке картосхем попиксельной спектральной классификации путем выбора доминирующего класса в локальных окрестностях (или сегментах). Показано, что учет близкорасположенных пикселей позволяет во всех случаях повысить точность классификации ГСИ. Так доля верно классифицированных пикселей с использованием только спектральных признаков методом опорных векторов (SVM) составила для изображения природной зоны — 79,7%, а использование пространственных признаков позволило ее увеличить до 92–93%.



а) б) в) г)

а — исходное изображение, б — попиксельная SVM классификация,
в — SVM классификация с последующим голосованием пикселей в сегментах картосхемы,
г — предварительное усреднение по сегментам и SVM классификация
Рис. 1. Обработка фрагмента ГСИ

Таким образом, совместная обработка спектральных и пространственных признаков перспективна из-за использования дополнительной информации о коррелированности близкорасположенных пикселей гиперспектральных изображений.

Formation, analysis and classification of hyperspectral images

O.I. Potaturkin[1, 2], *S.M. Borzov*[1]
[1] Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

C5.5 Разработка компьютерно-синтезированной голограммы для датчика волнового фронта

М.С. Ковалев, П.И. Малинина, С.Б. Одиноков
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Формирование эталонных волновых фронтов (ВФ) с погрешностью менее 0.01λ актуально для многих разделов оптики [1, 2]. Как правило, искажения ВФ возникают при прохождении излучения оптических элементов и являются следствием неоднородности распределения показателя преломления и наличием свилей. Для создания оптических систем с высоким качеством излучения используют различные способы измерения и коррекции аберраций ВФ. В качестве перспективной альтернативы датчикам Гартмана и его разновидности — Шака — Гартмана предлагается использовать компьютерно-синтезированную голограмму (КСГ) в задаче ДВФ.

В данной работе голографический ДВФ представляет собой модовый детектор, на основе мультиплексированной голограммы, в которую заранее закодированы требуемые значения аберраций. Принцип работы КСГ ДВФ совпадает с основным голографическим принципом: для измерения фазы опорного луча необходима его интерференция с предметным.

Кодированная единичная КСГ представляет собой распределение интенсивности от двух волн — опорной $Basic(x, y)$ и предметной (объектной — $Object(x, y)$). Опорной волной будем считать аберрационный ВФ содержащий одну аберрацию определенного типа и амплитуды, предметной — поле от пикселя, расположенного согласно матрице аберраций. Предложено использовать строки приемника для определения типа аберрации, столбцы приемника для определения ее величины.

Тип аберрации однозначно описывается математическим представлением — ортогональным базисом полиномов Цернике [3]. Таким образом, если численное значение искажения ВФ попадает в записанный диапазон, голограмма будет воспроизводить изображение на приемнике в соответствии с предложенной матрицей. В случае, когда искаженный ВФ представляет собой комбинацию аберраций — картина на приемнике будет выглядеть как набор светящихся точек. Обработка сигнала с приемника даст представление о степени искажения (соответственно столбцу) и типу искажения (соответственно строке) ВФ.

Амплитуда функции пропускания определяется комбинацией опорной и предметной волн:

$$\begin{aligned} I(x,y) &= \left|O(x,y)+B(x,y)\right|^2 = \\ &= \left|B(x,y)\right|^2 + \left|O(x,y)\right|^2 + O(x,y)B^*(x,y) + O^*(x,y)B(x,y), \end{aligned} \tag{1}$$

где $O(x, y)$ — объектная волна, $B(x, y)$ — опорная волна, знак * означает комплексно-сопряженную величину; $O(x, y) = |O(x, y)|\exp[i\varphi_0(x, y)]$ — комплексная амплитуда объектной волны с вещественной амплитудой $|O(x, y)|$ и фазой $\varphi_0(x, y)$; $B(x, y) = |B(x, y)|\exp[i\varphi_B(x, y)]$ — означает аналогичным образом комплексную амплитуду опорной волны.

Исходная объектная волна (изображение точки на приемнике) восстанавливается путем освещения голограммы опорной волной $B(x, y)$. Для восстановления изображения умножим записанную голограмму, т.е. интенсивность интерференционной картины $I(x, y)$ на значение поля опорной волны $B(x, y)$:

$$\begin{aligned} I(x,y)B(x,y) &= \left|B(x,y)\right|^2 B(x,y) + \left|O(x,y)\right|^2 B(x,y) + \\ &+ O(x,y)\left|B(x,y)\right|^2 + B^2(x,y)O^*(x,y). \end{aligned} \tag{2}$$

Итоговая КСГ будет представлять собой сумму рассчитанных единичных голограмм:

$$КСГ(x,y)=\sum_{n=1}^{N}КСГ_n. \quad (3)$$

Запись рассчитанной структуры на фоточувствительный материал возможна проекционным методом с применением ЖК-ПВМС.

Источники

[1] Голуб М.А. Получение асферических волновых фронтов при помощи голограмм / М.А. Голуб, Е.С. Живописцев, А.М. Карпеев, И.И. Сисакян, В.А. Сойфер // Доклады АН СССР. — 1980. — 253 с. — С. 1104–1108.
[2] Nikitin A. A device based on the Shack-Hartmann Wave Front sensor for testing wide apertures / A. Nikitin, J. Sheldakova, A. Kudryashov, G. Borsoni, D. Denisov, V. Karasik, A. Sakharov // Photonic Instrumentation Engineering III. — 2016
[3] Hopkins H.H. Wave theory of aberrations. — 1949.

Design of computer generated hologram for wavefront sensor

M.S. Kovalev, P.I. Malinina, S.B. Odinokov
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

C5.6 Программно-аппаратный комплекс датчика формы волнового фронта

В.Н. Хомутов
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Введение

Проблема контроля качества оптической поверхности остро стоит во всех отраслях оптической индустрии и как правило сводится к задаче контроля формы волнового фронта. Наиболее распространены методы контроля волнового фронта с применением интерферометров [1] или специальных датчиков волнового фронта (ДВФ). Одним из самых универсальных ДВФ является датчик, построенный по схеме Шека — Гартмана. Оптическая схема датчиков Шека — Гартмана значительно проще схемы любого современного интерферометра, следовательно, менее чувствительна к факторам внешнего воздействия. Самые простые модели таких датчиков обеспечивают точность λ/10 — λ/20. Благодаря своей оптической схеме Датчики Шека — Гартмана универсальны, они находят применение в различных отраслях науки и техники практически без изменения конструкции. Однако ДВФ требуют значительных затрат вычислительных ресурсов для обработки измерительных данных. Это означает что при проведении измерений ДВФ должен быть обязательно подключен к компьютеру, который осуществляет управление датчиком и обработку данных. Эта может значительно ограничивать область применения ДВФ.

Целью данной работы является создание единого портативного программно-аппаратного комплекса для построения ДВФ Шека — Гартмана различного типа и назначения

Схема датчика Шека — Гартмана

ДВФ построенный по схеме Шека — Гартмана состоит из двух основных компонентов — микролинзового растра и экрана наблюдения. Схема работает следующим образом: световой пучок отражается от исследуемой оптической поверхности, а затем разбивается на множество световых пучков с помощью микролинзового растра. Положение пучков на экране наблюдения соответствует наклону волнового фронта в некоторой малой области наблюдения. Их координаты могут быть рассчитаны по формуле [2]:

$$X_k = \frac{\sum_j^m \sum_i^n x_i I_{i,j}}{\sum_j^m \sum_i^n I_{i,j}}, \quad Y_k = \frac{\sum_j^m \sum_i^n y_i I_{i,j}}{\sum_j^m \sum_i^n I_{i,j}}, \tag{1}$$

где $I_{i,j}$ — интенсивность в ячейке (пикселе) фотоматрицы (x_i, y_j) k-ой локальной апертуры.

Локальный наклон волнового фронта соответствует $W(x, y)$ в точках (x_k, y_k) соответствует уравнениям:

$$\frac{\partial W_k}{\partial x} = \frac{\Delta x_k}{f}, \quad \frac{\partial W_k}{\partial y} = \frac{\Delta y_k}{f}, \tag{2}$$

где f — фокальное расстояние линзового растра, Δx, Δy — локальное смещение центров фокальных пятен вдоль осей x, y.

Вычислив смещения на каждом участке можно непосредственно найти коэффициенты разложения для $W(x, y)$ методом наименьших квадратов. Точность ДВФ определяется сразу несколькими параметрами — разрешением микролинзового растра, разрешением светочувствительной матрицы, и точностью их юстировки друг относительно друга [3].

В современных ДВФ, построенных по схеме Шека — Гартмана в качестве экрана наблюдения как, правило используются светочувствительные сенсоры. А процесс измерения и обработка данных выполняется с помощью компьютера, что упрощает процесс измерения и повышает точность работы датчика. Структурная схема современных датчиков Шека — Гартмана показана на рис. 1.

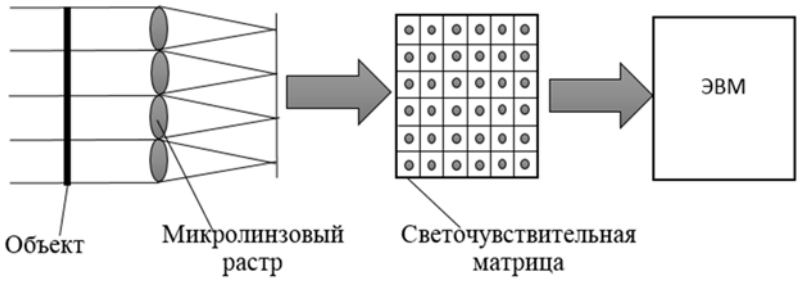


Рис. 1. Схема датчика Шека — Гартмана

Основном преимуществом ДВФ, построенных по схеме Шека — Гартмана является возможность работы без использования референсной поверхности.

Портативная платформа

Все известные ДВФ построенные на основе схемы Шека — Гартмана предназначены для стационарного использования, их применение в условиях производства затруднено в том числе по причине необходимости использования мощных вычислительных машин для обработки получаемых данных. В данной работе предложен портативный вариант датчика волнового фронта построенного по схеме Шека — Гартмана, его структурная схема приведена на рис. 2. Полупроводниковый лазерный модуль ($\lambda = 635$ нм) с расходящимся пучком освещает измеряемую поверхность. Интенсивность излучения лазерного модуля задаётся с помощью ШИМ сигнала. Лазерное излечение отражается от исследуемой поверхности и разбиваясь на пучки микролинзовым растром попадает на ПЗС сенсор ICX687ALA с разрешением 2020×1476. Обработка изображений осуществляется микрокомпьютером. Результаты измерения выводятся на ЖК дисплей с диагональю 4 дюйма. Также возможна реализация передачи результатов измерения на внешние устройства по Wi-Fi или сохранение результатов на SD-карту. Управление прибором осуществляется трёхкнопочной клавиатурой подключений к портам GPIO микрокомпьютера.

Программное обеспечение датчика было разработано для микрокомпьютеров, работающих под операционной системой Linux. Вычислительный модуль датчика разработан на основе программного обеспечения Jacopo Antonello mshwfs. Интерфейс управления датчиком разработан с применением технологии QT.

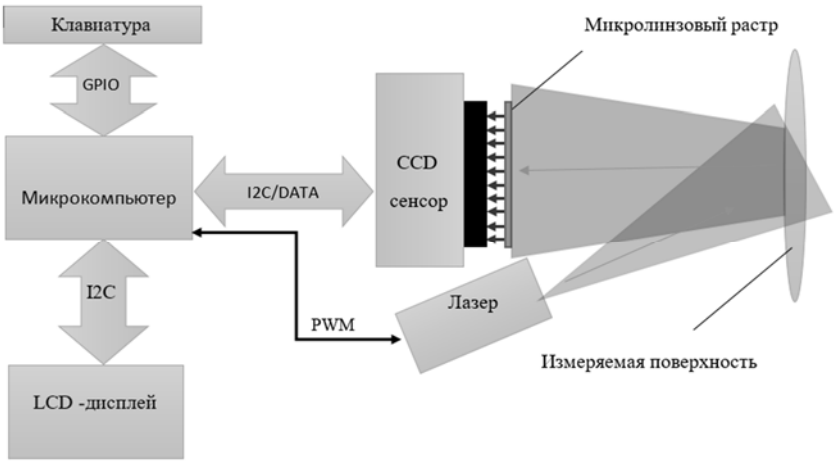
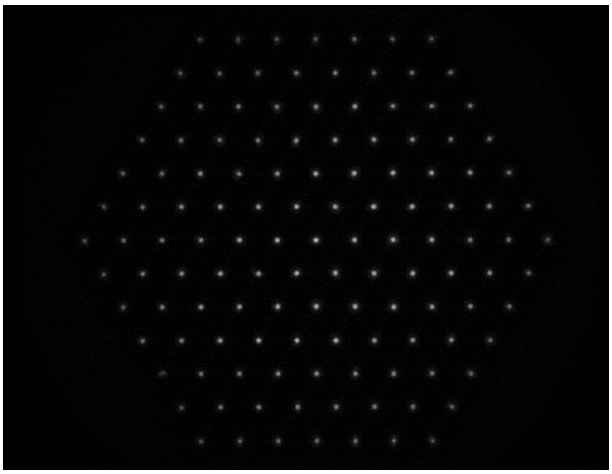


Рис. 2. Схема портативного датчика волнового фронта

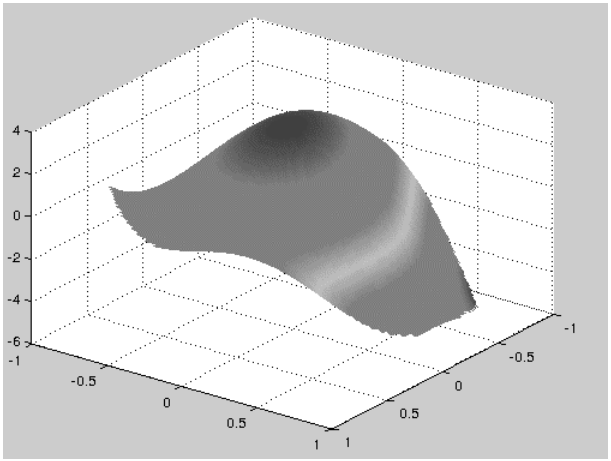
Результаты

На основе разработанного программно-аппаратного комплекса ДВФ был собран датчик Шека — Гартмана с разрешением 13×13 микролинз, что соответствует точности измерения ≈λ/10. Существует возможность использования этой конфигурации датчика с микролинзовыми растрами высокого разрешения, при этом точность измерения возрастёт.

Было проведено тестирование работы программного модуля ДВФ с помощью демонстрационных гартмоногорамм предоставленных mshwfs. Демонстрационная гартмонограмма mshwfs и фазовая карта, рассчитанная микрокомпьютером датчика волнового фронта представлены на рис. 3. Полученная фазовая карта полностью соответствует фазовой карте, полученной с помощью программного обеспечения mshwfs в математическом пакете MATLAB.



а) гартмонограмма



б) фазовая карта

Рис. 3. Результат тестирования датчика волнового фронта

Заключение

Показана возможность создания портативных ДВФ. Данный подход может быть применён к датчикам любого класса и назначения в том числе для промышленных и офтальмологических решений. При использовании гартмонограмм высокого разрешения (100×100) точность измерения значительно возрастёт и позволит использовать ДВФ для прецизионного контроля.

Источники

[1] Полещук А.Г. Лазерный интерферометр ФТИ-100 / А.Г. Полещук, Р.К. Насыров, А.Е. Маточкин, В.В. Черкашин, В.Н. Хомутов // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2013. — Том 5. — №3. — С. 25–31.
[2] Jiang W. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor / W. Jiang, H. Xian, F. Shen // Chin. J. Quantum Electron. — 1998. — №15 (2). — P. 218–227.
[3] Neal D.R. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy / D.R. Neal, J. Copland, D. Neal // SPIE Proc. — 2002. — Vol. 4779. — P. 148–160.

Hardware-software complex of wavefront sensor

V.N. Khomutov
Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Results of development of a unified portable hardware-software complex to build Shak Hartmann wavefront sensors of various types and purposes are presented and discussed.

C5.7 Спектральные свойства слоистых голографических отражательных структур

Е.Ф. Пен[1, 2], П.А. Чубаков[1]
[1] Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия
[2] Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Слоистые голографические отражательные структуры

Свойства объемных пропускающих и отражательных голографических решеток детально изучены Г. Когельником и другими авторами, показавшими, что такие решетки наряду с большой дифракционной эффективностью (ДЭ) демонстрируют высокую угловую и спектральную селективность [1]. Менее изучены слоистые структуры, состоящие из нескольких объемных решеток, разделенных оптически однородными промежуточными слоями, и обладающие особыми свойствами, обусловленными интерференцией волн, восстановленных из каждой решетки, что предоставляет возможность управления видом угловой или спектральной селективности [2–3]. Подобные структуры могут быть использованы при создании элементов оптических межсоединений, мультиплексоров/демультиплексоров DWDM в оптических линиях связи [4].

Схема исследуемых нами структур изображена на рис. 1, где *VHG1* и *VHG2* — две объемные голографические отражательные решётки, расположенные слева и справа относительно стеклянной подложки *L*. Длина волны лазерного излучения, а также значения углов падения пучков *R* и *S* относительно поверхности регистрирующей среды определяют период образующейся голографической решётки, а, следовательно, и резонансную длину волны спектрального отклика при её облучении белым светом.

По существу эти структуры являются аналогами классического интерферометра Фабри — Перо [5]. Особенности состоят лишь в свойствах зеркал резонатора, в качестве которых используются отражательные голографические брэгговские решётки. В свою очередь спектральные свойства этих решёток в значительной степени зависят от характеристик регистрирующей среды, используемой при их изготовлении, что в конечном итоге определяет возможности практического использования исследуемых структур.

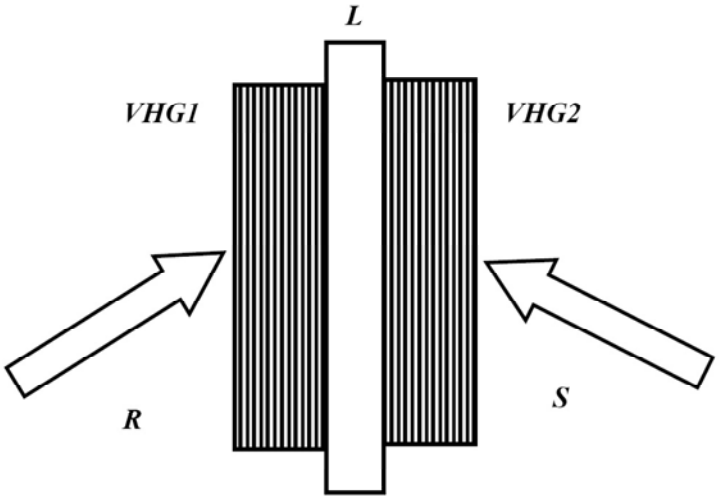


Рис. 1. Схема слоистой голографической отражательной структуры

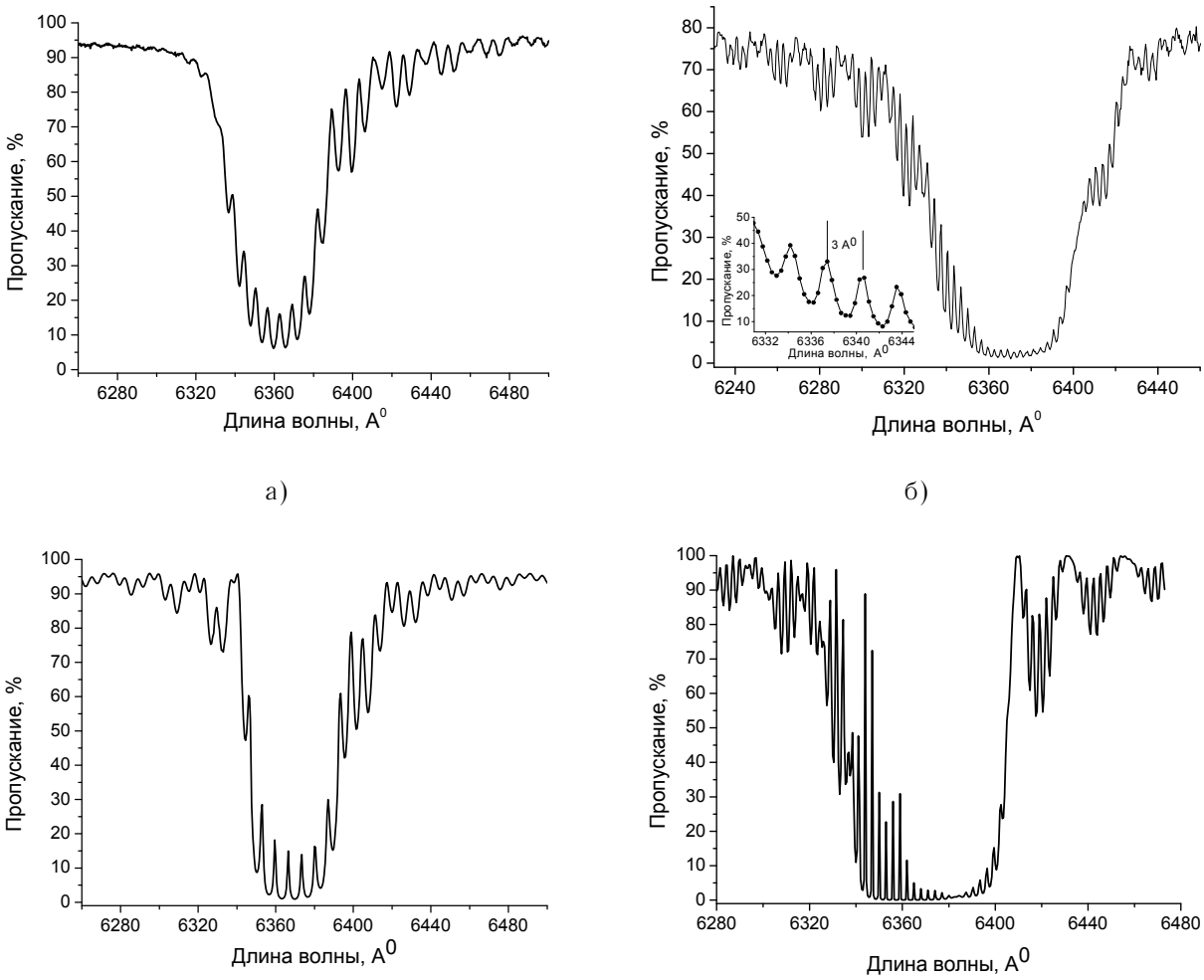
Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований нами использованы различные методы и устройства, в том числе установки для формирования исследуемых структур и измерения их спектров пропускания на спектрофотометре высокого разрешения Ramanor U1000, а также прямое наблюдение на экране картины пропускания данных структур, являющихся, как отмечено ранее, аналогами интерферометра Фабри — Перо. В качестве регистрирующей среды использовались экспериментальные образцы голографического фотополимерного материала (ФПМ).

На рис. 2а и рис. 2б приведены экспериментальные данные спектров пропускания слоистых структур с толщинами промежуточных слоев $L = 175$ мкм и 450 мкм соответственно, сформированных с использованием He–Ne лазера. На рисунках хорошо видны глубокие провалы пропускания центральных лепестков контуров спектрального отклика в интервалах длин волн 6348–6388 Å и 6332–6406 Å, удовлетворяющих длине волны зондирующего излучения, а также тонкие периодические структуры как в области центральных, так и боковых лепестков, состоящие из множества локальных спектральных полос пропускания. Для образца с $L = 175$ мкм период тонкой структуры оказался ≈6,5 Å, а для образца с $L = 450$ мкм ≈3 Å (см. вставку к рис. 2б). В области центрального лепестка наблюдается изменение пропускания от 6% до 18%, а в области правого бокового лепестка — от 60% до 80%, что значительно отличается от расчетных значений. С учетом потерь света на поглощение в слое фотополимера коэффициент отражения голографических решёток составлял ≈80%.

Аналогичные структуры и соответствующие им спектры были получены с использованием DPSS лазера с длиной волны 5320 Å. В этом случае период локальных спектральных полос пропускания составил ≈2 Å. К сожалению, из-за недостаточного спектрального разрешения нашей установки в этом эксперименте не удалось получить детальной картины резкости этих полос.

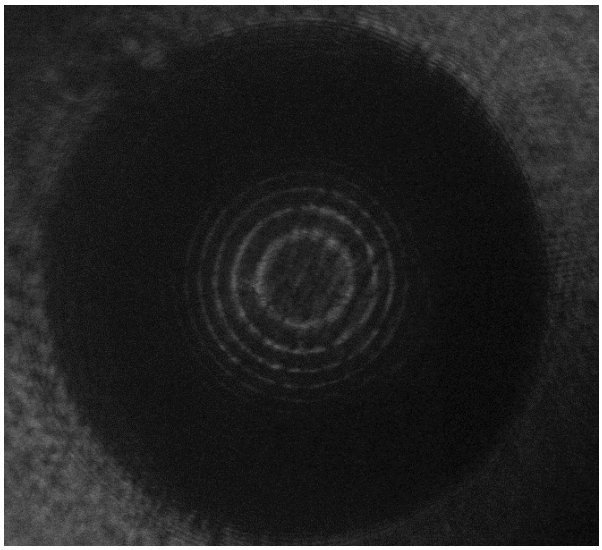
В целом эксперименты однозначно подтверждают ожидаемый эффект интерференционного взаимодействия волн, формируемых двумя брэгговскими решетками. Вместе с тем следует отметить существенные отличия экспериментальных и расчетных данных, полученных путем использования модели многослойной структуры тонких диэлектрических пленок [5]. Хорошо видно, что спектры несимметричны, боковые лепестки сглажены либо отсутствуют, пропускание локальных полос в области центрального лепестка мало. Очевидно, что эти отличия связаны с несовершенствами исследуемых структур двух видов:
а) поглощением света в регистрирующей среде, паразитными переотражениями и другими шумами в оптической системе, влияние которых в данной работе не исследуется;
б) специфическими искажениями внутренней пространственной структуры голографических решеток, такими как изменение амплитуды модуляции показателя преломления из-за различной энергии засветки по глубине решетки и нарушение периодичности решетки из-за усадки толщины ФПМ в процессе записи и постобработки голограмм [6]. Для проверки этих предположений проведены расчеты спектров пропускания модельных слоистых структур при условии изменений показателя преломления Δn и периода решёток по линейному закону на величину порядка (0,2–0,5)%.



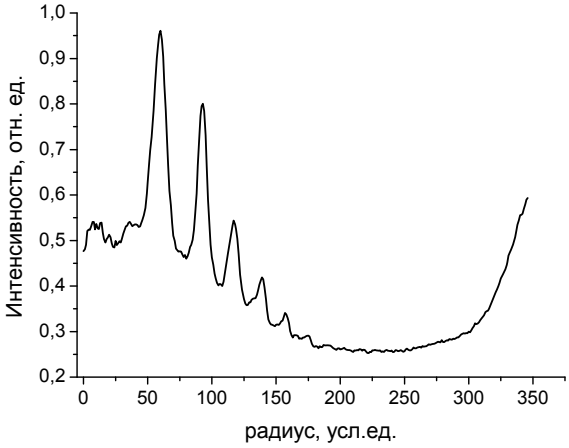
а и б — экспериментальные данные для образцов с толщинами промежуточных слоев $L = 175$ мкм и 450 мкм соответственно; в и г — расчетные данные для этих же структур в предположении неоднородности внутренней структуры голографических решеток и шаге вычислений 0,25 Å.

Рис. 2. Графики спектров пропускания слоистых структур

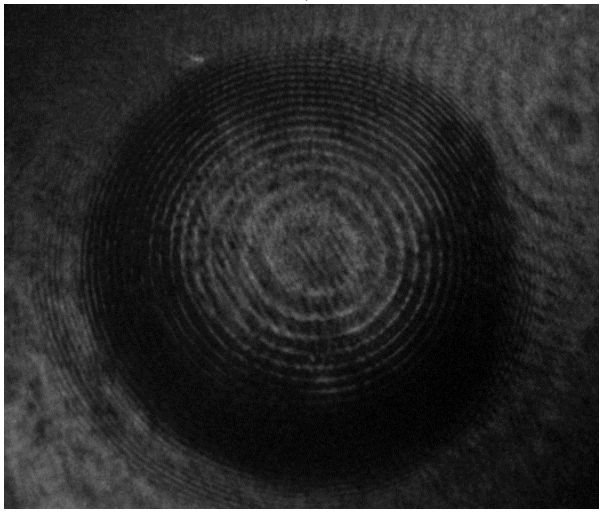
Результаты этих расчетов применительно к толщинам промежуточных слоев $L = 175$ мкм и 450 мкм и шаге вычислений 0,25 Å (выбранном для адекватности экспериментальной аппаратной функции спектрометра) приведены на рис. 2в и рис. 2г соответственно, демонстрирующих, что указанные искажения действительно влияют на вид спектральных характеристик исследуемых структур. Более точное сходство с экспериментальными данными можно достичь при учете дополнительных видов искажений внутренней структуры голографических решеток: изменений не только периода, но и направления вектора решеток из-за усадки регистрирующей среды одновременно в поперечном и продольном направлениях (относительно плоскости решетки), а также изменений амплитуды модуляции показателя преломления по нелинейному закону [6].



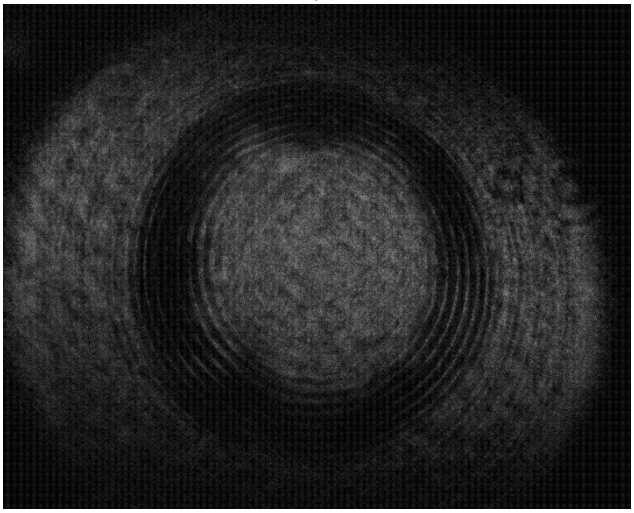
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Изображения интерференционных картин, соответствующих исследуемым структурам с толщинами промежуточных слоев 175 мкм (а, б) и 450 мкм (в, г)

На рис. 3 приведены изображения интерференционных картин, образующихся при освещении исследуемых структур расходящимся пучком лазерного излучения. Картина, представленная на рис. 3а, по существу является пространственным аналогом спектра пропускания слоистой структуры с толщиной промежуточного слоя $L = 175$ мкм, показанном на рис. 2а. Тёмная область соответствует полосе длин волн 6349–6388 Å, эффективно отражаемых данной парой голографических брэгговских зеркал. Внутри темной области хорошо видна структура светлых и темных колец, характерная для интерферометра Фабри — Перо. Количество наблюдаемых светлых колец, соответствующих локальным полосам пропускания, невелико (6 шт.), их интенсивность падает по мере удаления от центра картины, что обусловлено, очевидно, сравнительно малой величиной коэффициента отражения голографических решёток.

На рис. 3б показано радиальное распределение интенсивности (в относительных единицах) описываемой картины, усредненное в азимутальном направлении. Установлено, что в полном соответствии с теорией, расстояние между соседними кольцами уменьшается с ростом номера кольца, а разница квадратов радиусов соседних колец является величиной постоянной (с погрешностью менее 10%). Резкость колец (по критерию отношения расстояния

между кольцами к их полуширине [5]) не превышала 5:1. Паразитное рассеяние света в лазерном пучке, микрообъективе и микродефектах ФПМ снизило контраст интерференционной картины, который в среднем не превышал 2:1. Влияние этих факторов на спектральные характеристики исследуемых структур, безусловно, важно и будет изучено в дальнейшей работе.

На рис. 3в и рис. 3г приведены изображения интерференционных картин, относящихся к слоистой структуре с толщиной промежуточного слоя 450 мкм и различными резонансными длинами волн голографических решёток. Видна существенная пространственная неоднородность этих картин (свидетельствующая о неравномерности фазовых искажений в решётках на различных их участках), что не позволило провести обработку изображений и получить графики, аналогичные рис. 3б, однако вполне можно различить множество чередующихся светлых колец, соответствующих локальным полосам пропускания.

Заключение

Экспериментально подтверждено, что спектр пропускания слоистых голографических структур, состоящих из двух объемных голографических отражательных решеток, разделенных оптически однородным слоем, состоит из множества узких спектральных полос пропускания, период расположения которых определяется оптической толщиной промежуточного слоя, а их огибающая совпадает с контуром спектральной селективности одной решётки.

Анализ полученных спектральных характеристик показал их зависимость не только от параметров решеток и разделительного слоя, но и от степени неоднородности внутренней структуры решеток, приводящей к несимметричности контура спектрального отклика, уменьшению амплитуды локальных полос пропускания, ухудшению их разрешения. Путем сравнения экспериментальных и расчетных данных установлено, что в наибольшей степени влияют изменение амплитуды модуляции показателя преломления Δn из-за различной энергии засветки по глубине решетки и нарушение периодичности решетки из-за усадки толщины регистрирующего слоя в процессе записи и постобработки голограмм.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-02-00732).

Источники

[1] Kogelnik H. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings // The Bell System Technical Journal. — 1969. — Vol. 48. — №9. — P. 2909–2947.
[2] Якимович А.П. Многослойные объемные голографические решетки // Оптика и спектроскопия. — 1980. — Том 49. — №1. — С. 158–164.
[3] Пен Е.Ф. Свойства многослойных неоднородных голографических структур / Е.Ф. Пен, М.Ю. Родионов // Квантовая электроника. — 2010. — Том 40. — №10. — С.914–924.
[4] Yang D. Wavelength demultiplexing with layered multiple Bragg gratings in $LiNbO_3$:Fe crystal / D. Yang, H. Wang, X. Guo, J. Zhao, H. Xiang // Applied Optics. — 2007. — Vol. 46. — №23. — P. 5604–5607.
[5] Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. — М.: Изд. «НАУКА», 1970.
[6] Пен Е.Ф. Неоднородные и нестационарные брэгговские голограммы: модели и методы исследований / Е.Ф. Пен, М.Ю. Родионов // Автометрия. — 2005. — №2. — С. 98–114.

Spectral properties of the layered holographic reflective structures

E.F. Pen[1, 2], P.A. Chubakov[1]
[1] Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia
[2] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The results of experimental investigations of the spectral properties of layered structures consisting of two reflective volume holographic gratings, separated by an optically uniform layer. When illuminating such structures by polychromatic light, interference interaction of the waves formed by the said gratings leading to the formation of a plurality of narrow spectral bandwidths, period of their locations is determined by the optical thickness of the intermediate layer, and envelope coincides with the contour of the spectral selectivity of the one grating.

Such structures can be used to create optical interconnection elements, multiplexers/demultiplexers in DWDM optical communications.

Experimentally confirmed the formation of this type of spectra with periodicity 2–8 Å (in different experiments) of the local bands of transmittance. In the measurements we used a high-resolution spectrometer Ramanor U1000, as well as the Fabry — Perot interferometer.

It was found that the non-uniformity (irregularity) of the internal structure of the holographic gratings due to the imperfections of the recording media (we used photopolymer material) substantially distort the spectral characteristics under study compared with their simple theoretical models: the spectrum is asymmetric, the transmittance of local bands is much less than the calculated value. By selecting the parameters mentioned irregularities reached similarity experimental data and simulation results.

C5.8 Оптическое кодирование QR кодов с использованием пространственно-некогерентного освещения

В.В. Краснов, Р.С. Стариков
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Методы оптического кодирования привлекают интерес исследователей на протяжении десятилетий [1]. Большинство существующих методов оптического кодирования используют когерентное освещение. В [2] нами был представлен метод оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Основной принцип этого подхода продемонстрирован на рис. 1. Объект освещается пространственно-некогерентным монохроматическим излучением, при отсутствии дифракционного оптического элемента (ДОЭ) линза формирует изображение объекта в плоскости фотоприемника. ДОЭ служит элементом кодирования, его ФРТ — ключом кодирования. Свет, проходящий через ДОЭ, формирует свертку изображения объекта и ФРТ ДОЭ. Зарегистрированная фотосенсором свертка является кодированным изображением.

В последнее время, кодирование цифровой информации в форме QR-кодов (quick response code — код быстрого отклика) стало довольно популярным [3–7] благодаря их универсальности и встроенному коду [8] коррекции ошибок.

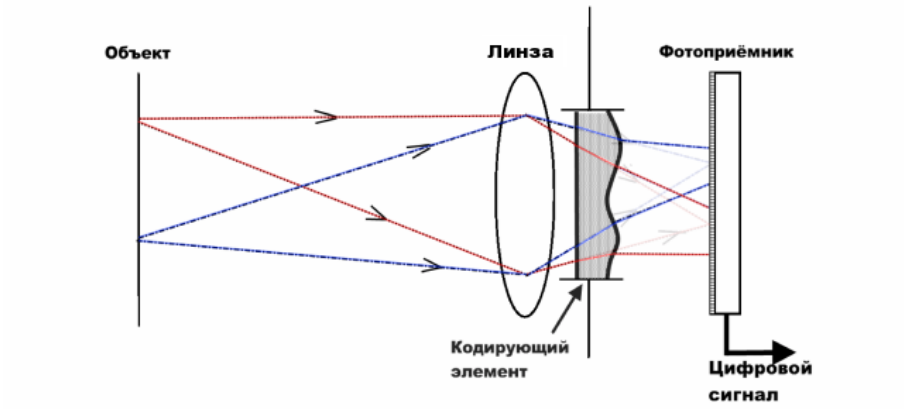


Рис. 1. Пример простейшей схемы оптического кодирования изображений с пространственно-некогерентным монохроматическим освещением

Целью данной работы является оптическое кодирование QR-кодов с использованием пространственно некогерентного освещения.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Линейно поляризованное лазерное излучения расширяется и коллимируется линзы Л1 и Л2. Затем пространственная когерентность разрушается вращающимся матовым рассеивателем ВМР. Пространственно-некогерентное монохроматическое излучение освещает амплитудный модулятор ПВМС1 который служит для ввода информации. Поляризатор П выбирает поляризацию для правильного функционирования фазового модулятора ПВМС2. ПВМС1 и ПВМС2 расположены в фокальных плоскостях линзы Л3. ПВМС2 используется для отображения синтезированного кодирующего ДОЭ. Отраженный от ПВМС2 свет проходит через анализатор А. Линза Л4 расположена таким образом, что когда ПВМС2 выключен и действует как зеркало, она формирует изображение поверхности ПВМС1 в плоскости фотосенсора камеры. Если на ПВМС2 отображается ДОЭ, в плоскости фотосенсора камеры формируется

оптическая свертка изображения поверхности ПВМС1 и ФРТ ДОЭ. Эта оптическая свертка является кодированным изображением.

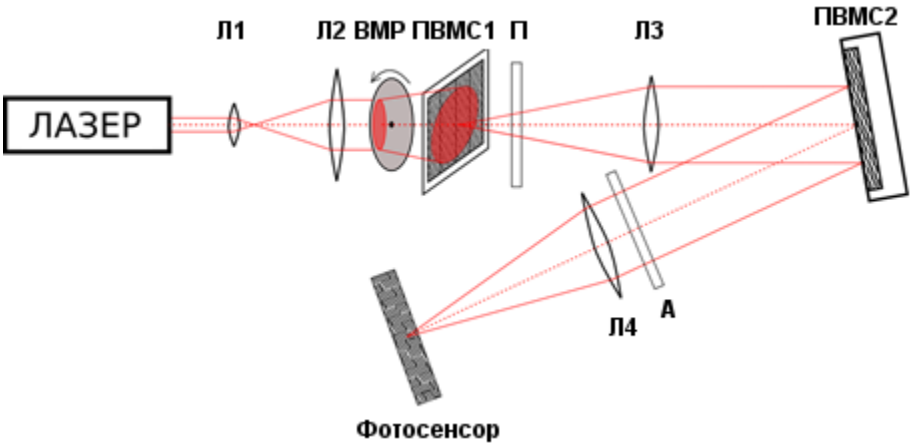
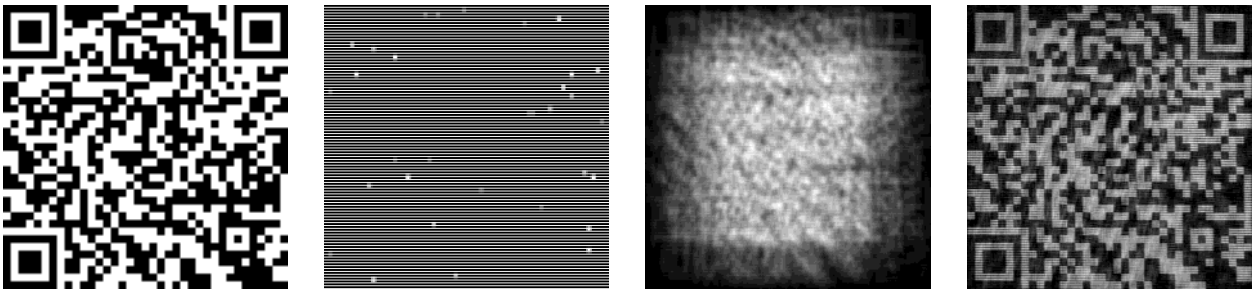


Рис. 2. Схема оптического кодирования изображений с пространственно некогерентным освещением

Метод прямого поиска со случайной траекторией (ППСТ) использовался для синтеза ключей кодирования, как описано в [9].

Кодирующий ДОЭ должен содержать ключ кодирования в своей ФРТ. Голограммы или киноформы могут использоваться с этой целью. Киноформы [10] — синтезируемые фазовые ДОЭ, подобные голограммам, но, в отличие от голограмм, формирующие единственный порядок дифракции. По этой причине киноформы использовались в качестве ДОЭ кодирования.

Пример оптического кодирования QR кода приведен на рис. 3: QR код (рис. 3а) кодируется ключом (рис. 3б), в результате чего формируется кодированное изображение (рис. 3в), после численного декодирования получаем декодированное изображение (рис. 3г).



а) б) в) г)

Рис. 3. QR код (а) кодируется ключом (б), в результате чего формируется кодированное изображение (в), после численного декодирования получаем декодированное изображение (г)

В работе было экспериментально осуществлено оптическое кодирование цифровой информации в форме QR-кодов, с использованием пространственно некогерентного освещения. Продемонстрировано успешное декодирование кодированных QR-кодов. Преимуществами нашего метода оптического кодирования являются лучшее отношение сигнал/шум по сравнению с когерентными методами кодирования и простая экспериментальная реализация.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-19-01751)

Источники

[1] Liu S. A review of optical image encryption techniques / S. Liu, C. Guo, J.T. Sheridan // Opt. Laser Technol. — 2014. — Vol. 57. — P. 327–342.
[2] 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 // SPIE Proc. — 2012. — Vol. 8429. — P. 84291P.
[3] Wang Z. Single-intensity-recording optical encryption technique based on phase retrieval algorithm and QR code / Z. Wang, S. Zhang, H. Liu, Y. Qin // Opt. Commun. — 2014. — Vol. 332. — P. 36–41.
[4] Barrera J.F. Experimental scrambling and noise reduction applied to the optical encryption of QR codes / J.F. Barrera, A. Velez, R. Torroba // Opt. Express. — Vol. 22. — №17. — P. 20268–20277.
[5] Barrera J.F. Optical encryption and QR codes: secure and noise-free information retrieval / J.F. Barrera, A. Mira, R. Torroba // Opt. Express. — 2013. — Vol. 21. — №5. —P. 5373-8.
[6] Lin C. Four-dimensional key design in amplitude, phase, polarization and distance for optical encryption based on polarization digital holography and QR code / C. Lin, X. Shen, B. Li // Opt. Express. — 2014. — Vol. 22. — №17. — P. 20727.
[7] Barrera J.F. Experimental QR code optical encryption: noise-free data recovering / J.F. Barrera, A. Mira-Agudelo, R. Torroba // Opt Lett. — 2014. — Vol. 39. —№10. — P. 3074–3077.
[8] ISO/IEC 18004:2006 — Information technology — Automatic identification and data capture techniques — QR Code 2005 bar code symbology specification / International Organization for Standardization. — ISO Standards, 2006.
[9] 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 // SPIE Proc. — 2014. — Vol. 9131. — P. 913125.
[10] Lesem L.B. The Kinoform: A New Wavefront Reconstruction Device / L.B. Lesem, P.M. Hirsch, J.A. Jordan // IBM Journal of Research and Development. — 1969. — Vol. 13. — №2. — P. 150–155.

QR codes optical encryption using spatially incoherent illumination

V.V. Krasnov, R.S. Starikov
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

Applications of optical methods for encryption purposes have been attracting interest of researchers for decades [1]. Majority of existing optical encryption techniques use coherent illumination. In [2] we presented the optical encryption technique which utilizes spatially incoherent illumination. Basic principle of optical encryption with spatially incoherent illumination is demonstrated in Fig. 1. Object is illuminated with spatially-incoherent monochromatic light. In the absence of diffractive optical element (DOE), lens forms object image in photosensor plane. DOE serves as encryption element, its PSF is an encryption key. Light passing through DOE forms convolution of object image and DOE PSF. Registered with photosensor convolution is encrypted image. This is similar to wavefront coding technique.

Recently, encryption of digital information in form of binary images has become quite popular. Quick response (QR) codes are of particular interest [3–7] due to their versatility and built-in error correction code [8].

The aim of this work is the optical encryption of QR codes using a spatially incoherent illumination.

Experimental setup is presented in Fig. 2. Linearly polarized laser radiation is expanded, collimated and filtered by combination of lenses L1 and L2. Then, spatial coherence is destroyed by rotating ground glass RGG. Spatially incoherent monochromatic radiation illuminates SLM1 which serves for QR code imaging. Polarizer P provides correct polarization for operation of SLM2. SLM1 and SLM2 are positioned in focal planes of lens L3. SLM2 is used for synthesized encryption DOE imaging. Reflected from SLM2 light passes through analyzer A required for correct operation of SLM2. Lens L4 positioned so that SLM2 is located in its rear focal plane and camera — in its front focal plane. When SLM2 is turned off and acts as a mirror, it forms image of SLM1 on camera's photosensor. If DOE is imaged on SLM2 then optical convolution of SLM1 image and DOE PSF is formed in photosensor plane. This optical convolution is encrypted image.

Direct search with random trajectory (DSRT) method was used for encryption keys generation as described in [9].

Encryption DOE must contain encryption key in its PSF. Holograms or kinoforms can be used for that purpose. Kinoforms [10] are synthesized phase DOE similar to holograms but, unlike holograms, forming single diffraction order. For that reason kinoforms were used as encryption DOE.

QR code optical encryption is demonstrated in Fig. 3: QR code (Fig. 3a) is encrypted with a key (Fig. 3b) forming encrypted image (Fig. 3c), decrypted image (Fig. 3d) is obtained after digital decryption.

Optical encryption of digital information in form of QR codes using spatially incoherent illumination was experimentally implemented. Successful decryption of encrypted QR codes was achieved. Advantages of our method include higher signal-to-noise ratio compared to coherent encryption techniques and easier experimental implementation.

Funding. Russian Science Foundation (RSF) (14-19-01751).

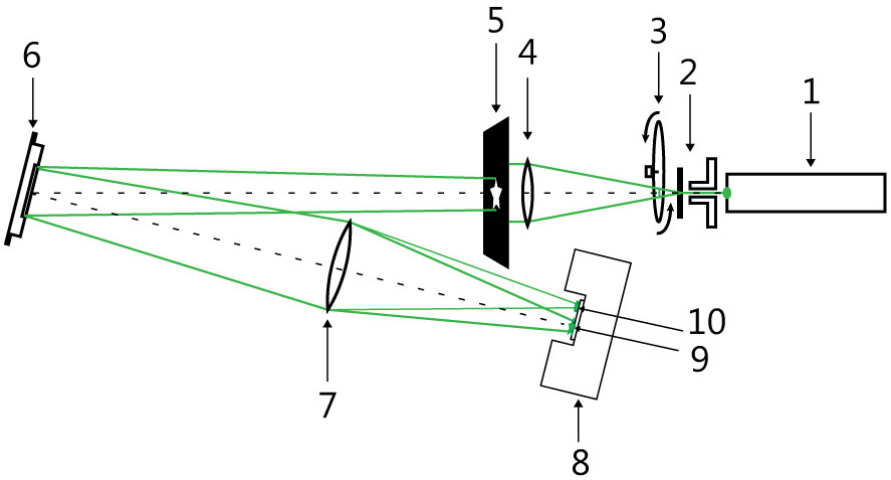
C5.9 Применение DMD-модулятора для вывода голографических фильтров в некогерентном корреляторе

Д.Ю. Молодцов, В.В. Краснов, П.А. Черёмхин, В.Г. Родин
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В настоящее время для решения задач распознавания объектов в реальном масштабе времени успешно применяются оптические корреляторы, использующие синтезированные фурье-голограммы в качестве фильтров пространственных частот. Ввод таких голограмм в оптическую схему коррелятора осуществляется с помощью пространственно-временного модулятора света (ПВМС), что позволяет значительно ускорить процесс обработки данных. Существует множество реализаций оптических корреляторов на базе ЖК-ПВМС различных типов. Большой интерес для применения в оптических корреляторах представляет и другой вид ПВМС — микрозеркальный DMD-модулятор (Digital Micromirror Device). Основное преимущество этого вида ПВМС перед ЖК-ПВМС в их большом быстродействии: при наличии подходящей электроники можно осуществлять смену бинарных распределений на модуляторе с частотой в 32 кГц. Технология DMD в настоящее время широко применяется в различных областях науки и техники: DLP-проекторы, голографические принтеры, 3D-дисплеи и др.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по применению DMD-модулятора для вывода голографических фильтров в некогерентном оптическом корреляторе. В качестве DMD-модулятора был использованы DMD-чип, производимый Texas Instruments 0.7 XGA 12° DDR (серия DLP7000) с разрешением 1024×768 пикселей, шаг матрицы составляет 13,68 мкм. Были проведены эксперименты по оценке влияния технологических погрешностей DMD-модулятора на формирование импульсного отклика голограмм. В этих экспериментах установлено, что для данного модулятора необходимо осуществлять вывод голограмм на определённом ограниченном участке его матрицы размером не более 300×300 пикселей. Это связано с тем, что поверхность матрицы нельзя считать идеально плоской, и использование всей её площади для вывода голограмм будет приводить к ухудшению качества восстановленных изображений.

На базе DMD-модулятора была собрана установка оптического коррелятора работающего в пространственно-некогерентном свете (рис. 1). Данная установка использует схему с одним объективом, а в качестве источника излучения использовался лазер с длиной волны 532 нм, пространственная когерентность которого разрушалась с помощью вращающегося матового рассеивателя. В проведённых экспериментах при совпадении входного и опорного объектов наблюдался локализованный корреляционный пик, показанный на рис. 2.



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 — камера; 9 — нулевой порядок (изображение объекта); 10 — первый порядок дифракции (область корреляционного сигнала)

Рис. 1. Принципиальная схема некогерентного оптического коррелятора на базе DMD-модулятора, использующего один объектив

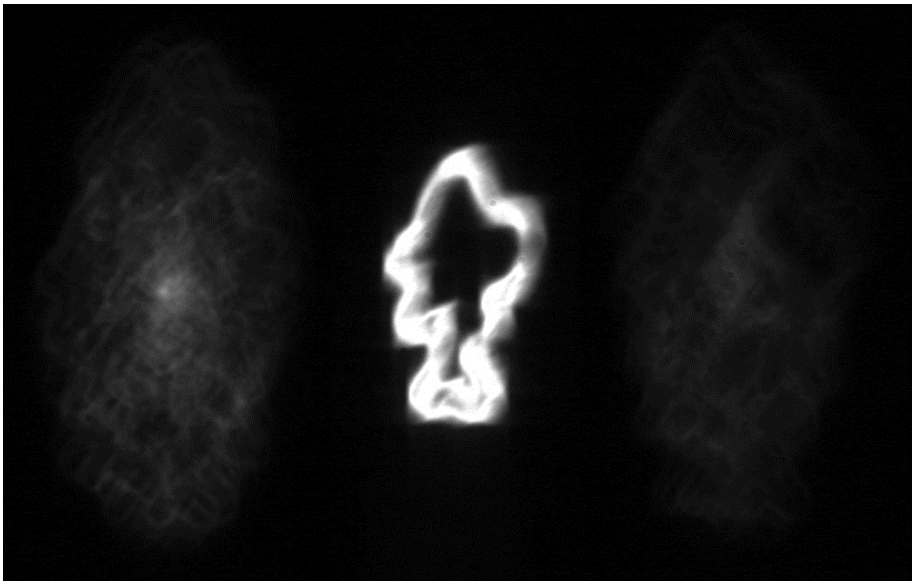


Рис. 2. Сигнал корреляции и изображение входного объекта при совпадении входного и опорного объектов

В работе при использовании различных тестовых объектов получены корреляционные сигналы, показывающие возможности использования DMD-модулятора в установке оптического коррелятора для вывода голографических фильтров. По виду корреляцилонных сигналов можно сделать вывод об успешном распознавании объектов в некогерентом оптическом корреляторе на базе DMD-модулятора.

Using of DMD-modulator in non-coherent optical holographic correlator

D.Yu. Molodtsov, V.V. Krasnov, P.A. Cheremkhin, V.G. Rodin
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

Optical correlators are applied successfully for real-time object recognition. In these devices synthesized Fourier-holograms are used as spatial frequency filters. Displaying such holograms in optical correlators is implemented using spatial light modulator, which enables very fast data processing. There are many setups of optical correlators based on LCD-SLM of different types. But another kind of SLM, DMD (Digital Micromirror Device), is used infrequently in optical correlators. The main advantage of DMD-SLM relative to LCD-LSM is its very high operation speed. One can be reached frequency of 32 kHz of binary distributions displaying. DMD technology is now widely used in various fields of science and technology: DLP-projectors, holographic printers, 3D-displays and others.

In this work the results of DMD-SLM applying for holographic filters displaying in non-coherent optical correlator are presented. As DMD-SLM DMD-chip Texas Instruments 0.7 XGA 12° DDR (DLP7000series) was used. Its resolution is 1024×768 pixels, DMD-matrix step is 13.68 μm. Experiments for estimation of impact of DMD-modulator manufacture errors on the formation of the hologram impulse responses were conducted. It was found that it is necessary to display holograms on the modulator at a determined flat area of DMD-matrix size which is not more than 300×300 pixels. This is concerned with the facts that DMD-matrix surface cannot be considered as perfectly flat due to manufacture errors, and using of its entire area for displaying holograms will degrade the quality of the reconstructed images.

The setup of non-coherent optical correlator based on the DMD-modulator uses a single objective. The laser with a wavelength of 532 nm was used as source of illumination. The spatial coherence of laser was destroyed by a rotating diffuser. The experiments on recognition of test objects were performed. When the coincidence of the input and reference objects took place, localized correlation peak was observed. This fact demonstrates the successful objects recognition in such correlator.

С5.10 Применение двух источников излучения в оптической схеме спекл-интерферометра в задачах экспериментальной доводки деталей турбомашин

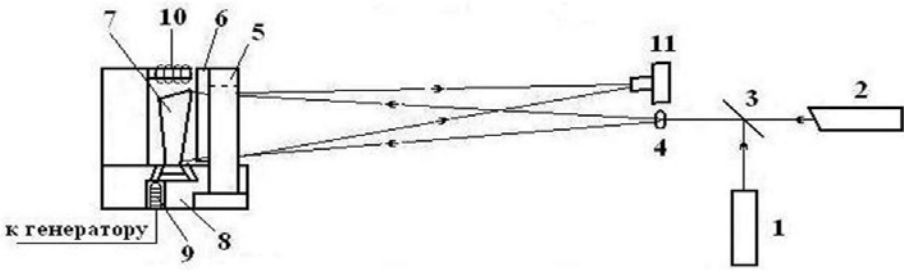
А.И. Жужукин
ПАО «КУЗНЕЦОВ», Самара, Россия

В настоящее время для изучения полей деформаций и напряжений на поверхности и в объёме деталей и конструкций таких энергетических установок, как турбомашины эффективно используется сочетание расчётных и экспериментальных методов.

К наиболее современным экспериментальным методам относятся методы голографической и спекл-интерферометрии [1–3]. Голографические методы исследования предъявляют повышенные требования к виброизоляции оптической схемы и связаны с процессом «мокрой» обработки фоторегистрирующих материалов. В последнее десятилетие широкое распространение получил метод цифровой спекл-интерферометрии. Обладая достоинствами голографической интерферометрии, он позволяет проводить автоматизированные исследования с записью экспериментальных данных на ЭВМ с их последующей обработкой.

При регистрации статических и динамических деформаций объекта методом цифровой спекл-интерферометрии особое внимание уделяется выбору оптической схемы интерферометра. В большинстве случаев при решении подобных задач используется оптическая схема цифрового спекл-интерферометра (ЦСИ) с гладкой опорной волной и разделёнными пучками. Однако схемы таких ЦСИ оказываются громоздкими и требуют тщательной юстировки и надёжной виброизоляции. В связи с этим на ПАО «КУЗНЕЦОВ» для регистрации статических и динамических деформаций деталей турбомашин разработан ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной, в котором опорный пучок сформирован с помощью диффузора, расположенного перед исследуемым объектом. Оптическая схема такого ЦСИ проста при юстировке, содержит малое число оптических элементов и обладает собственным запасом устойчивости к внешним воздействиям. Другим важным достоинством ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной является возможность использования цифровой фотокамеры в качестве регистрирующей системы, что позволяет значительно повысить качество записываемых спекл-интерферограмм.

В настоящей работе рассмотрено ещё одно преимущество этой установки, которое заключается в возможности использования в оптической схеме двух источников излучения одновременно, причём источники излучения могут быть одной длины волны, а могут иметь разные длины волн (рис. 1). Оба эти случая имеют самостоятельное значение.

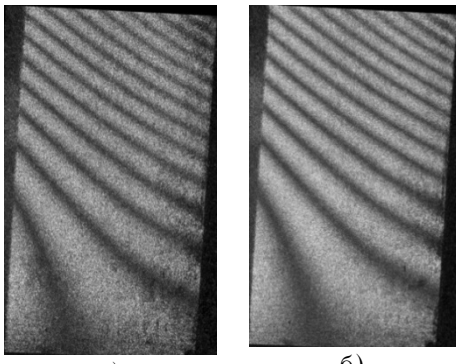


1 — лазер, 2 — лазер, 3 — светоделитель, 4 — расширитель пучка, 5 — держатель диффузора, 6 — диффузор, 7 — исследуемая деталь, 8 — зажимное устройство, 9 — пьезовозбудитель, 10 — электромагнит, 11 — фотокамера

Рис. 1. Оптическая схема ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной с двумя источниками излучения

Установка на рис. 1 позволяет проводить исследования как при статическом нагружении, так и при вибрационных испытаниях. При этом для регистрации статических деформаций отключаются от источника питания пьезовозбудитель 9 и электромагнитное устройство 10.

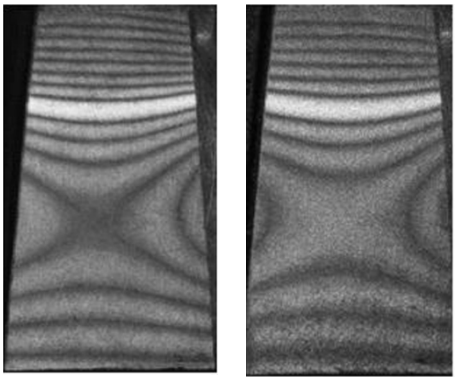
Одновременное использование двух источников излучения одной длины волны позволяет повысить качество получаемых интерферограмм (рис. 2).



а) б)

Рис. 2. Спекл-интерферограммы деформационного поля перемещений при статическом нагружении рабочей лопатки 7-й ступени компрессора, полученные с использованием одного источника излучения (а) и двух источников излучениия (б)

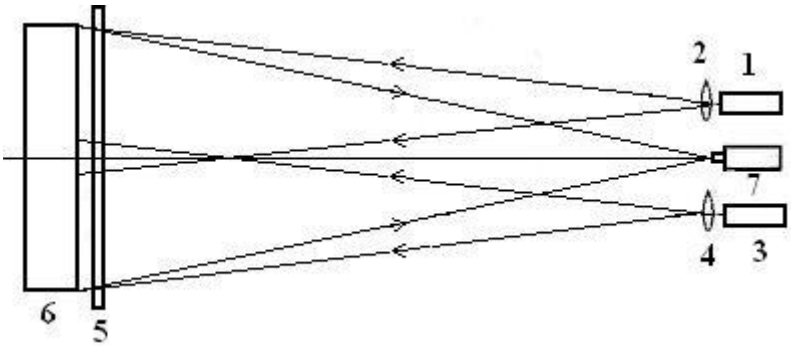
Использование двух источников излучения с различной длиной волны позволяет увеличить количество экспериментальных точек при определении поля перемещений (рис. 3).



а) $\lambda_1 = 532$ нм б) $\lambda_2 = 632{,}8$ нм

Рис. 3. Спекл-интерферограммы колеблющейся на частоте 2233 Гц лопатки направляющего аппарата 7-й ступени компрессора, полученные с помощью установки на рис. 1

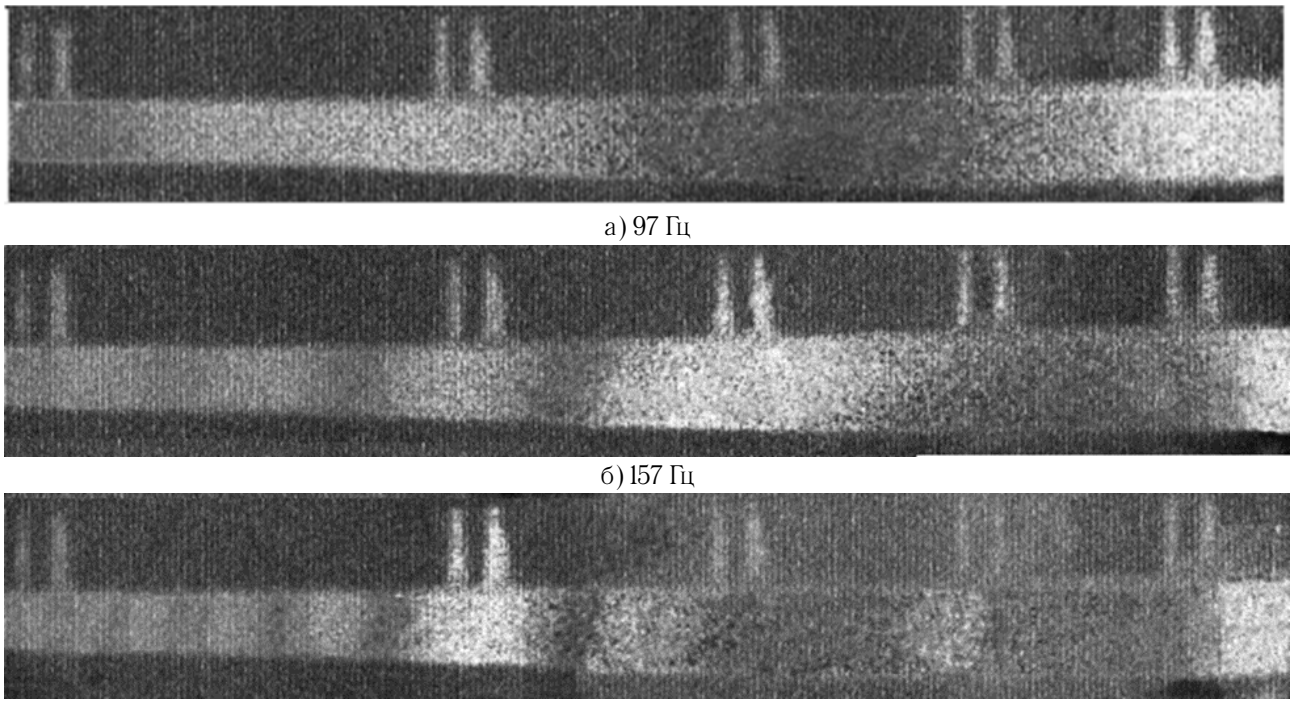
Важное практическое значение имеет возможность применения двух источников излучения при исследовании колебаний протяжённых деталей. Оптическая схема в этом случае имеет вид, как показано на рис. 4.



1, 2 — лазеры; 2, 4 — расширительные линзы; 5 — диффузор;
6 — исследуемый объект, 7 — регистрирующее устройство

Рис. 4. Оптическая схема ЦСИ с двумя источниками излучения для исследования протяженных объектов

В этом случае лазер 1 и лазер 2 должны быть одной длины волны. С помощью приведённой на рис. 4 установки были проведены исследования вибрационных характеристик гребёнки для замера равномерности воздушного потока на входе авиационного двигателя (рис. 5).



а) 97 Гц

б) 157 Гц

в) 251 Гц

Рис. 5. Частоты и формы колебаний гребенки

Таким образом, для исследования статических и динамических деформаций деталей турбомашин разработан ЦСИ с двумя источниками излучения. Применение этой установки позволяет в случае использования источников излучения с одной длиной волны повысить качество получаемых спекл-интерферограмм, при использовании источников излучения с разными длинами волн появляется возможность получения дополнительных экспериментальных точек для построения эпюры смещений. Кроме того, включение двух

источников излучения в оптическую схему ЦСИ позволяет проведение исследования деформаций протяженных деталей, применяемых в турбомашинах.

Источники

[1] Макаева Р.Х. Исследование резонансных частот и форм колебаний лопаток компрессора ГТД с применением голографической интерферометрии / Р.Х. Макаева, А.Х. Каримов, А.М. Царева, Э.М. Фатыхова // Авиационно-космическая техника и технология. — 2011. — №8 (85). — С. 57–60.

[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. — №9 (95). — С. 203–207.

[3] Селезнев В.Г. Исследование форм и частот колебаний бандажированного колеса вентилятора на голографической установке и в составе двигателя на испытательном стенде / В.Г. Селезнев, О.А. Коскин // Вестник СГАУ имени академика С.П. Королёва. — 2014. — №5 (47), ч. 2. — С. 109–114.

Use of two radiation sources in speckle-interferometer optical arrangement for turbo machinery parts experimental development tasks

A.I. Zhuzhukin
PJSC “Kuznetsov”, Samara, Russia

Possibility of two radiation sources simultaneous use has been studied in optical arrangement of speckle-interferometer with combined beams and speckle-modulated background wave. The results of this plant application are given at the use of radiation sources with the same wave lengths and with different wave lengths in turbo machinery parts experimental development tasks.

C5.11 Лазерная интроскопия кремниевых пластин

З.Т. Азаматов, В.И. Редкоречев, К.П. Абдурахманов, И.А. Кулагин, Н.А. Акбарова
Ташкентский университет информационных технологий, Ташкент, Узбекистан
Национальный Университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

Показана возможность обнаружения дефектов кремниевых пластин на основе Фурье анализа цифровых изображений, полученных с помощью лазерной интроскопии.

Интроскопия это неразрушающее исследование внутренней структуры непрозрачного объекта и протекающих в нём процессов с помощью звуковых волн, электромагнитного излучения, постоянного и переменного электромагнитного поля или потоков элементарных частиц. В последнее время для развития элементной базы фотоники все более актуальной становится разработка методов неразрушающей диагностики и контроля на всех технологических этапах: контроль исходных материалов, полуфабрикатов и готовых изделий, а также анализ причин отказов, возникающих в процессе испытаний и эксплуатации. Незаменимыми для локальной диагностики являются различные микрозондовые методы, наиболее приемлемыми и универсальными среди которых являются электронно-зондовые и оптические зондовые методы. Развитие дефектной структуры кристалла при технологических процессах, прежде всего определяется развитием термически индуцируемых микродефектов технологических примесей (кислорода и углерода) в пластинах кремния, образованием и отжигом упругих напряжений вокруг углеродных и кислородных преципитатов. В термообработанных пластинах кремния прошедших технологические этапы маршрута изготовления полупроводниковых изделий требуется использование неразрушающего метода изучения объёмных преципитатов технологических примесей.

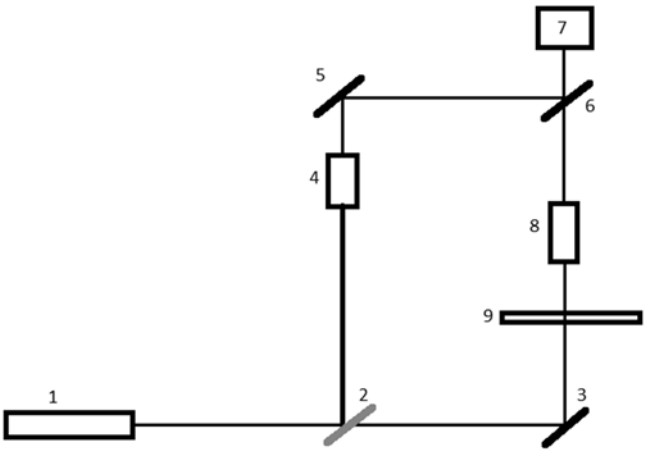
По сравнению с электронно-зондовыми методами оптическая диагностика в инфракрасном диапазоне позволяет визуализировать объемные электрически нейтральные дефекты, такие как кислородные и металлические преципитаты, дефекты упаковки, дислокации, линий скольжения и пустоты в пластинах кремния, арсенид галлия, германия и в изделиях на их основе, а также визуализировать существующие в них различные микрополя. Значительная глубина проникновения ИК-излучения в полупроводниковых материалах в сочетании с регистрацией сигналов-откликов различной физической природы позволяет реализовать комплексную диагностику микроэлектронных изделий и материалов с применением компьютерной и аппаратурной томографии. Таким образом, для визуализации и анализа структуры оптических материалов и изделий фотоники большую важность приобретает задача создания многофункционального оборудования и технологии диагностики, рассмотрения физических особенностей формирования контраста изображений электронейтральных дефектов и элементов в полупроводниковых кристаллах и применение полученных результатов для решения научных и практических задач.

В настоящей работе проведены исследования по развитию методов лазерной интроскопии кремниевых пластин. Разработанная схема интроскопа представлена на рис. 1. Схема состоит из 2-х каналов лазерного излучения, которые формируются на разделительном клине 2. В канале излучения, отраженного от клина 2, формируется опорный пучок. В канале прошедшем через клин 2 излучения формируется объектный пучок. На внешней поверхности клина 6 оба пучка интерферируют и картина голографической интерферограммы фиксируется CCD камерой 7. Оцифрованные данные подаются в компьютер, где обрабатываются специальной программой и визуализируются на экране.

В полном объеме схема работает как голографическая система с разным увеличением вплоть до увеличения микроскопа. В режиме съемки голограмм Френеля схема позволяет

послойно восстанавливать изображение микрообъектов внутри полупроводниковых пластин. При соответствующем восстановлении цифровых голографических изображений схема может работать как микроскоп-интроскоп.

В качестве источника излучения был выбран сравнительно недорогой DPSS лазер. Данный твердотельный лазер с диодной накачкой излучает на длине волны 1 060 нм. Ширина спектра лазерного излучения менее 2 нм. Длина когерентности составляет несколько метров. Мощность лазера составляла 200 мВт в одномодовом или двухмодовом режимах. Лазер не термостабилизирован, и его основная частота изменяется с нагревом активного элемента. Однако, при съемке цифровых интерферограмм с интервалом десятки секунд изменение частоты со временем практически не сказывается на интерференционной картине.



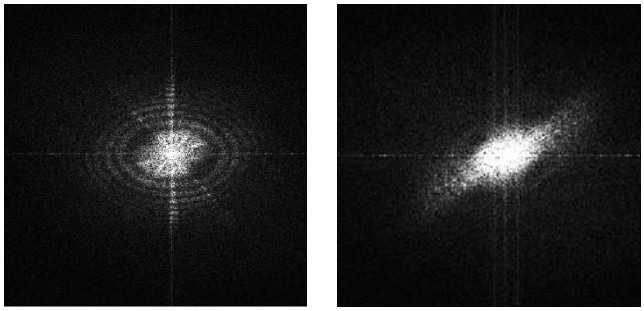
1 — лазер, 2, 6 — оптический клин, 3,5 — зеркало, 4,8 — объектив, 7 — CCD камера, 9 — пластина кремния
Рис. 1. Оптическая схема интроскопа

Был изготовлен рабочий макет интроскопа выполненный по схеме рис. 1. Фотографии макета представлены на рис. 2.

Записанная цифровая голограмма представляет собой матрицу оцифрованных значений интенсивности, аналогичную матрице цифровых значений, получаемых цифровой камерой при записи цифровых голограмм в видимом диапазоне, т.е. матрицу комплексных значений, из которой программной обработкой восстанавливается трехмерная картина фазы излучения, прошедшего через исследуемый образец. С помощью известного метода Френеля — Кирхгофа распределение фазы может быть получено в любом сечении образца, что дает информацию о глубине расположения дефектов. Применение методов цифровой интерферометрии позволяет получать разрешение по глубине $\lambda \times 10^{-3} \times H$, где λ — длина волны, H — шаг оцифровки. Например, при $\lambda = 5$ мкм, $H = 1/256$ (8-битовая оцифровка), точность определения расположения дефекта по глубине составит 16 нм.

Рис. 2. Фотография макета интроскопа

В качестве исследованных объектов были выбраны пластины кремния, отличающиеся толщиной и степенью полировки поверхности. Проведенные исследования показали, что внутренние точечные дефекты пластины играют роль микролинз и создают точечные изображения. Для получения более полной информации о внутренних дефектах пластин для каждой электронной фотографии тестируемой пластины программным образом строился Фурье образ изображения, рассеянного на дефектах лазерного излучения, который служил критерием дефектности пластины. На рис. 3 представлены изображения Фурье образов двух кремниевых пластин. Толщина данных пластин составляла 0,5 мм. Пластина, Фурье образ которой представлен на рис. 3а, была полирована с одной стороны, тогда как другая пластина была полирована с двух сторон (рис. 3б).



а) б)

Рис. 3. Фурье образы изображений для двух кремниевых пластин

Из сравнения рисунков, видно, что Фурье образы двух изображений кремниевых пластин значительно отличаются, что служит основой для методики обнаружения дефектов кремниевых пластин.

Таким образом, проведенные исследований показали перспективность использования данной методики анализа Фурье образов изображений, полученных с помощью лазерной интроскопии, для диагностики кремниевых пластин.

Источники

[1] Азаматов З.Т. Цифровая многоцветная пикосекундная голографическая спектроскопия нелинейных кристаллов / З.Т. Азаматов, В.С. Гуревич, М.Е. Гусев, Ю.Н. Захаров, И.А. Кулагин, В.И. Редкоречев // Сборник трудов Международной конференции Когерентная и Нелинейная Оптика. — Питер, 2010. — 2 стр.
[2] Гапонов В.Е. Цифровая голографическая интерферометрия в резонансной акустической спектроскопии / В.Е. Гапонов, З.Т. Азаматов, А.М. Исаев, В.И. Редкоречев // 2-я международная конференция «Оптика и Фотоника 2013», 25—27 сентября 2013 г., Самарканд, Узбекистан.
[3] Хусаинов И.А., Редкоречев В.И., Кулагин И.А., Азаматов З.Т. Устройство для дистанционной дефектоскопии. FAP 00886.

Laser introscopy of silicon wafer

З.Т. Азаматов, В.И. Редкоречев, К.П. Абдурахманов, И.А. Кулагин, Н.А. Акбарова
Tashkent University of Information Technologies, Tashkent, Uzbekistan
Center of High Technologies, Tashkent, Uzbekistan

The possibility of detection of defects in silicon wafers by Fourier analysis of digital images obtained by laser introscopy is shown.

С5.12 Идентификация состояния лопатки турбины авиационного двигателя до и после теплового воздействия по голографическим интерферограммам

А.М. Царева, Д.М. Сафина, А.Р. Юсупова, Р.Х. Макаева
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

Лопатки турбины авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) являются самыми нагруженными деталями самолёта. При нормальной эксплуатации двигателя материал лопатки турбины сохраняет структуру и прочностные свойства, приданные ему термической обработкой в процессе изготовления детали.

При работе ГТД могут возникнуть неисправности, приводящие к повышению температуры газов в турбине.

Для сохранения прочности при эксплуатационных воздействиях: вибрации и высоких температур, материал, из которого изготавливаются лопатки, обладает жаропрочными свойствами. Однако встречаются случаи перегрева материала всей лопатки или её части до температуры, превышающей расчётную для данного сплава, и тогда материал теряет оптимальную структуру, в результате чего меняются его механические свойства: уменьшается изгибная жесткость, проводящая к изменению картины поля деформации на лопатке [1].

В настоящее время на производстве перегрев деталей из жаропрочных сплавов определяется разрушающими методами контроля путём вырезания из лопаток образцов для контроля структурного состояния материала.

Известны работы, в которых исследовалась связь между числом интерференционных полос на интерферограмме и структурным изменением материала деталей. Например, в работе [2] для обнаружения этой связи применялся голографический метод двух экспозиций. На голографических интерферограммах лопаток получали картины регулярных полос, количество которых при фиксированных нагрузках зависела от разной эксплуатационной наработки и перегрева лопатки.

Для выявления влияния изменения структуры материала на картины деформаций резонансных колебаний лопаток в настоящей работе применялся метод голографической интерферометрии усреднения по времени.

Исследовались рабочие лопатки I-й ступени авиационного ГТД, изготовленные из жаропрочного сплава ЖС6УВИ. Детали крепились жестко в специальном приспособлении. Возбуждение колебаний, контроль частот и регистрация голограмм производились способом, описанным в работе [3]. Условия крепления лопаток были неизменными. Разброс резонансных частот при многократных идентичных закреплениях лопатки была порядка 0,7% относительно среднеарифметического значения параметра. Диапазон исследованных частот составил 500–36 000 Гц.

На рис. 1 представлены некоторые голографические интерферограммы форм колебаний лопатки I-й ступени авиационного ГТД до воздействия высокой температуры. На рисунке указаны значения резонансных частот, на которых проявляются собственные формы колебаний.

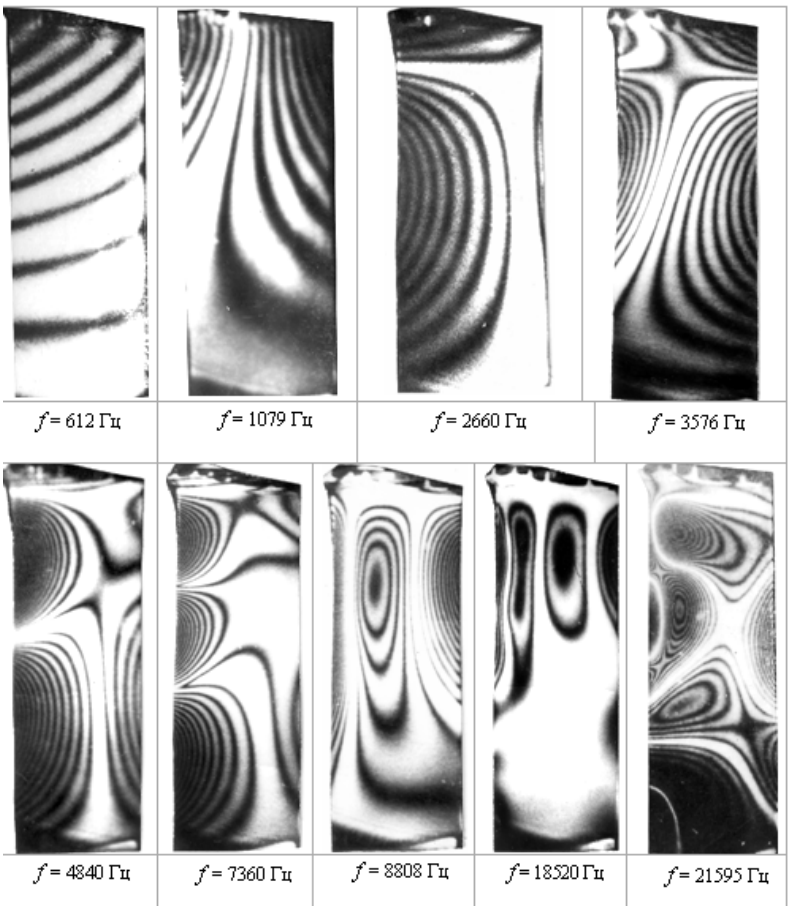


Рис. 1. Формы колебания лопатки турбины ГТД, визуализированные голографическим методом усреднения по времени

Из полученного спектра частот были выбраны три вида резонансных форм: в низком диапазоне частот, среднем и высоком. Следует отметить, что амплитуда колебаний подбиралась таким образом, чтобы на интерферограмме было достаточное количество разрешенных интерференционных полос. При этом фиксировались уровень нагрузки (В) и уровень возбуждения колебаний по отклику микрофона (дБ).

После съёмок лопатка подвергалась термическому воздействию: её нагревали в печи при температуре 1150°С в течение 30 минут. Металлографическими исследованиями было зафиксировано изменение структуры металла в связи с разупрочнением сплава.

Затем охлажденная лопатка устанавливалась в приспособлении, и в ней возбуждались резонансные колебания. Условия эксперимента были сохранены. Для сравнения состояния перегретой лопатки с прежним её состоянием необходимо было получить одинаковые по амплитуде картины форм колебаний. Это достигалось путём регулировки подающего от генератора на вибратор сигнала. Последний генерировал тот же уровень возбуждения колебаний лопатки, что и при регистрации голографических интерферограмм лопатки в исходном состоянии. Однако для получения прежних значений отклика (дБ), а, следовательно, того же самого количества интерференционных полос, необходимо было усиливать сигнал уровня вибрационного нагружения (В). Отсюда следует, что перегретый материал лопатки обладает более высокими демпфирующими свойствами.

Из литературных источников известно [4], что однотипные детали дают одинаковые картины собственных форм на низких частотах (100–15 000 Гц) независимо от их конфигурации и размеров. На более высоких частотах картины собственных форм зависят от физических характеристик объектов.

Действительно, как показали результаты проведённых исследований (рис. 2) голографические интерферограммы низкочастотных колебаний, например, при $f = 9\,117$ Гц, $f = 11\,019$ Гц (формы колебаний лопатки в исходном состоянии) и при $f = 9\,057$ Гц, $f = 10\,896$ Гц (формы колебаний лопатки после термического воздействия) имеют идентичный характер и не отражают изменения деформационных свойств материала.

Эксперименты показали, что в частотном диапазоне свыше 25 000 Гц картины резонансных форм колебаний чувствительны к изменению деформационных характеристик. Это проявилось в изменении рисунка форм колебаний перегретой лопатки по сравнению с начальным её состоянием. На примере высокочастотных форм колебаний при $f = 27\,814$ Гц (лопатка в исходном состоянии) и $f = 27\,566$ Гц (форма колебаний лопатки после термического воздействия) видно изменение поля деформации на поверхности лопатки вдоль выходной кромки, выраженное изменением характера интерференционных полос.

Анализ частотных характеристик показал, что перегрев материала сопровождается уменьшением значений резонансных частот.

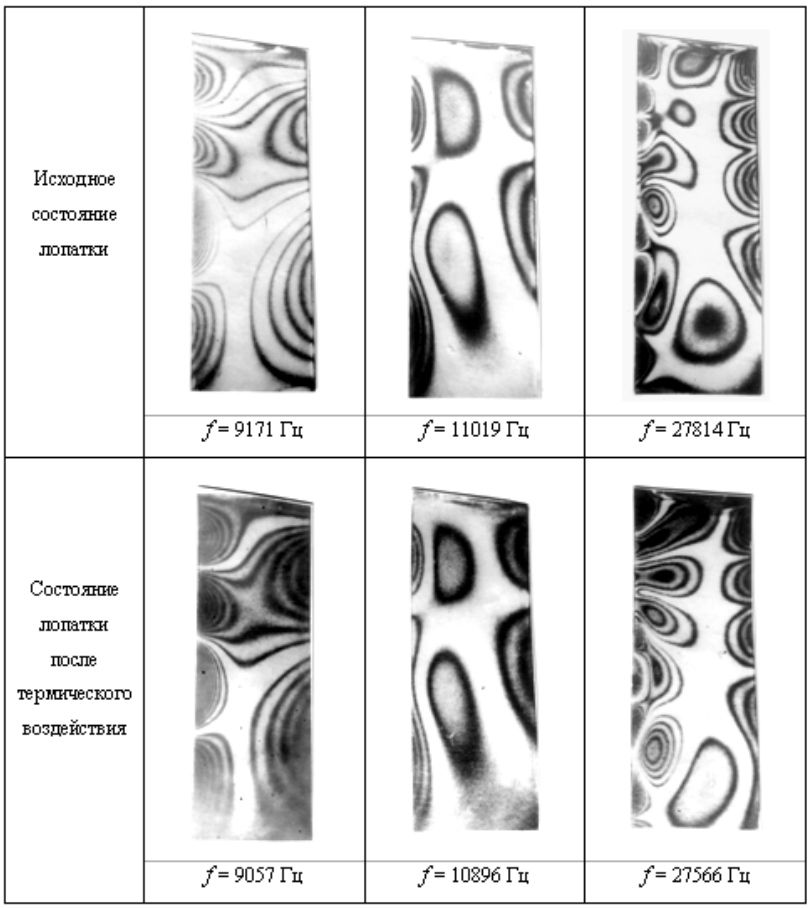


Рис. 2. Голографическая идентификация состояния лопатки до и после перегрева

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что между характером картин высокочастотных форм колебаний и состоянием материала жаропрочных сплавов по голографическим интерферограммам существует связь. Локальные изменения состояния материала в результате перегрева можно определить по изменению рисунка высокочастотных форм колебаний.

Проведённые исследования показали возможность применения голографической интерферометрии для неразрушающего контроля перегрева лопаток турбины

Источники

[1] Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1969. — 752 с.
[2] Заруцкий М.А. Идентификация структуры материала деталей методом голографической интерферометрии // Оптическая голография и её применение / Под ред. Ю.Н. Денисюка и Ю.И. Островского — Л.: Наука, 1977. — С. 86–95.
[3] Макаева Р.Х. Определение вибрационных характеристик деталей ГТД методом голографической интерферометрии / Р.Х. Макаева, А.Х. Каримов, А.М. Царева // Изв. вузов. Авиационная техника. — 2007. — №1. — С. 78–80.
[4] Голографические неразрушающие исследования / Пер. с англ.; Под ред. Р.К. Эрфа — М.: Машиностроение, 1979 — 448 с.

Identification of the status of turbine blades of aircraft engines before and after heat exposure using holographic interferograms

A.M. Tsareva, D.M. Safina, A.P. Yusupova, R.Kh. Makayeva
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

The article is sanctified to researches of possibility of application holographic interferometry for non-destructive testing of overheat the GTE turbine blades material.

Vibration characteristics of details were researched: own frequencies and vibration resonant oscillatory forms of blades before and after an overheat.

Experimental researches were conducted by holographic interferometry method of averaging on time.

It is set that the overheat of blades material conduces to the decline of own vibration frequencies values of blades, and also — to the change of picture of vibration resonant forms in a high-frequency range.

The researches results show the possibility of application of holographic interferometry for non-destructive testing of an overheat of GTE turbine blades.

Научное издание

Голография. Наука и Практика

XIII Международная Конференция
ГолоЭкспо 2016

12–15 сентября 2016 г.
Ярославль, Россия

Тезисы докладов

Ответственный редактор: А.Ю. Жердев
Редакторы: Я.А. Град, Л.А. Найдён

Подписано в печать 27.07.2016
Типография ООО «Дельта-центр»
107076, Москва, Стромынка, 18
Формат 60×90 1/16, Бумага офсетная
Печать офсетная, Усл. печ. л. 26
Тираж 100 экз. Заказ №340

МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5с1