

**КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи  
УДК.: 681.7+621.385

**ТОКОНОВ АКИНАЛЫ ТУРГУНАЛИЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОЙ  
ЗАПИСИ И ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ  
ФУРЬЕ - ГОЛОГРАММ СПЕКЛ - ПОЛЕМ**

**Специальность:** 05.11.07 Оптические и оптико - электронные  
приборы и комплексы

**А в т о р е ф е р а т**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Бишкек 2004**

**КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи  
УДК.: 681.7+621.385

**ТОКОНОВ АКИНАЛЫ ТУРГУНАЛИЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОЙ  
ЗАПИСИ И ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ  
ФУРЬЕ - ГОЛОГРАММ СПЕКЛ - ПОЛЕМ**

Специальность: 05.11.07 – Оптические и оптико - электронные  
приборы и комплексы

**А в т о р е ф е р а т**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Бишкек – 2004**

Работа выполнена в Кыргызском Техническом университете  
имени И. Раззакова

Научный консультант: академик НАН КР,  
доктор технических наук,  
профессор К.М. Жумалиев.

Научные руководители: член – корреспондент НАН КР,  
доктор технических наук,  
профессор У.Н. Бримкулов;

доктор технических наук,  
профессор Ж.И. Батырканов.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор Ф.Х. Байбулатов ;

кандидат технических наук  
Ж. А. Исмаилов .

Ведущая организация: Ошский технологический университет

Защита состоится " 11 " июня 2004 г. в 14<sup>00</sup> часов  
на заседании Диссертационного Совета Д05.04.239 при Кыргызско –  
Российском Славянском университете по адресу 720000, г. Бишкек,  
улица, Киевская, 44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кыргызско –  
Российского Славянского университета.

Автореферат разослан " 8 " мая 2004 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного Совета Д05.04.239,  
кандидат технических наук, доцент

 Ю.П. Симаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Основная проблема, связанная с получением качественных Фурье – голограмм входных страниц, заключается в регистрации интенсивности света, изменяющейся в широком диапазоне. Существуют методы, которые позволяют добиться достаточно однородного распределения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы. В методе де фокусировки плоскости регистрации голограммы смещаются от точной Фурье плоскости на небольшое расстояние  $\Delta f$ , причем  $\Delta f \ll f$  (где  $f$  – фокусное расстояние). Распределение интенсивности информационной световой волны в смещенной плоскости характеризуется большей однородностью. Тем самым удается получить качественные голограммы с дифракционной эффективностью 10 - 12% и отношением сигнал/шум равным 20 - 30. Наряду с положительными качествами, дефокусировка приводит к следующим не желательным последствиям: во-первых, снижается избыточность, во-вторых, увеличивается площадь голограммы и следовательно, понижается плотность записи информации.

Более совершенный метод - метод случайной фазы, позволяющий добиться высокой однородности распределения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы при сохранении высокой избыточности и плотности хранения, был предложен К.Беркхартом. Сущность этого метода заключается в дополнительной модуляции фазы световых лучей, проходящих через транспарант входных данных по случайному закону. Это приводит к случайному распределению фаз световых волн в плоскости регистрации, в результате чего распределение интенсивности интерференционной картины принимает значительно более однородный характер. Фазовая маска не влияет на распределение интенсивности света в плоскости изображений, так как она изменяет лишь фазу информационной световой волны, а информация вносится в объектный световой поток путем пространственной модуляции по амплитуде. Единственная цель состоит в достижении максимальной однородности распределения интенсивности света в плоскости регистрации. При этом дифракционная эффективность для фазовых голограмм достигает 20-24 %, а отношение сигнал/шум равняется 30 и более. Однако изготовление фазовой маски и согласование ее с транспарантом технологически очень сложно.

В связи с тем, что процессы записи и восстановления голограмм, экспериментального определения различных характеристик требуют высокоточного позиционирования и программного движения отдельных функциональных элементов системы, они требуют автоматизации вышеуказанных процессов на основе современных средств вычислительной техники, при которых обеспечивается высокая точность технологических процессов и гибкость к переходу к различным технологическим режимам работы. В связи с этим исследование записи Фурье - голограмм с использованием спекл-волн и разработка технологии мультиплексирования голограмм и системы автоматизации и управления технологическими процессами имеет актуальный характер.

**Цель и задачи исследований.** Целью диссертационной работы является: исследование физико-технических характеристик регистрации Фурье – голограмм спекл-полем; разработка технологии мультиплексирования голограмм; разработка и исследование системы автоматизации и управления технологическими процессами производства голографических изделий.

**Задачи исследований:**

- анализ методов регистрации качественных Фурье - голограмм входных страниц и выбор перспективного варианта;
- разработка технологии мультиплексирования Фурье - голограмм спекл-полем с применением возможностей компьютерных технологий;

– исследование особенности изменения физико – технических характеристик спекл – голограмм при гиперсенсбилизации регистрирующего слоя;

– разработка системы автоматизации и управления технологическими процессами в производстве голографических изделий;

**Достоверность научных результатов и положений.** Достоверность полученных результатов и выводов достигается использованием апробированных методов исследования, подкрепленных статистической обработкой результатов, а также согласием экспериментальных данных с теоретическими оценками. Корректность полученных данных гарантирована применением аппаратуры, прошедшей метрологическую аттестацию и регулярно проверяемой в процессе исследований.

**Научная новизна результатов исследований заключается в следующем:**

- разработан и обоснован метод достижения однородного распределения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы при использовании спекл-волны, позволяющий получить качественные Фурье - голограммы входных страниц;

- разработана технология мультиплексирования Фурье - голограмм на основе свойства автокорреляционной функции световых спекл – полей путем вращения опорного пучка вокруг предметного пучка с применением компьютерной технологии;

- исследована зависимость физико-технических характеристик от глубины неоднородностей распределения интенсивности гиперсенсбилизации, а также предложен способ записи Фурье – голограмм спекл-полем при гиперсенсбилизации регистрирующего слоя опорным пучком;

- разработана система автоматического управления экспериментальной установки для производстве голографических изделий, позволяющая гибко перестраивать систему на различные режимы работы;

**Практическая значимость полученных результатов:**

- предложенный метод однородного распределения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы при использовании спекл-волны, позволяет получить качественные Фурье - голограммы входных страниц;

- разработанная технология мультиплексирования Фурье - голограмм на основе свойства автокорреляционной функции световых спекл-полей путем вращения опорного пучка вокруг предметного пучка с применением компьютерной технологии позволяет повысить информационную емкость систем голографической памяти;

- способ записи Фурье - голограмм спекл-полем с гиперсенсбилизацией регистрирующего слоя опорным пучком позволяют улучшить информационные характеристики фотополимерного носителя;

- разработанная система автоматического управления позволяет повысить качество голографических\* изделий, а программное обеспечение дает возможность гибко перестраивать режимы работы системы.

**Экономическая значимость полученных результатов.** - Применение предлагаемого метода улучшит технико-экономические показатели голограмм, позволит существенно сэкономить материальные затраты на предприятиях, выпускающих голографические изделия.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту :**

- спекл-волновой метод регистрации голограмм, позволяющий получить качественные Фурье - голограммы входных страниц;

- технология мультиплексирования Фурье - голограмм на основе свойства автокорреляционной функции световых спекл – полей путем вращения опорного пучка вокруг предметного пучка с применением компьютерной технологии;

- закономерности изменения физико – технических характеристик голограмм от глубины неоднородностей распределения интенсивности гиперсенсбилизации;

- структура системы автоматического управления экспериментальной установки для производстве голографических изделий с программным обеспечением, позволяющий гибко перестраивать систему на различные режимы работы.

**Личный вклад соискателя.** Все основные научные результаты диссертационной работы получены автором лично.

Научному консультанту академику НАН КР, д.т.н., профессору Жумалиеву К.М. и научным руководителям член-корр. НАН КР, д.т.н., профессору Бримкулову У.Н. и д.т.н., профессору Батырканову Ж.И. принадлежат постановка задач и обсуждение полученных результатов.

Совместными с академиком НАН КР, д.т.н., профессором Жумалиевым К.М., и д.т.н., с.н.с. Сагымбаевым А.А. являются отдельные результаты, связанные с выполнением хоздоговорных НИР и работ по договорам о научно-техническом сотрудничестве со странами СНГ.

В совместных работах автору принадлежат теоретические исследование и анализ полученных результатов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международном семинаре «Голография и оптическая обработка информации», посвященный 20-летию лаборатории «Оптоэлектроника», (г. Бишкек, КР, 2-4 сентябрь, 1997г.), Международной конференции «Технологии и перспективы современного инженерного образования, науки и производства», посвященная 45-летию организации ФПИ-КТУ им. И. Раззакова. (г. Бишкек 7-8 октября, 1999 г.), Научно – практической конференции «Наука и наукоемкие горные технологии», (г. Бишкек 21-25 июня 2000 г.), Международной конференции «Проблемы управления и информатики», посвященная 40-летию института автоматки, (г. Бишкек 19-22 сентября 2000 г.), Международной конференции «Телекоммуникационные и информационные технологии. Состояние и проблемы развития». (г. Бишкек 6-11 июля 2001 г.), Международном семинаре «Голография и оптическая обработка информации» (г. Бишкек 5-7 сентября 2001 г.), Международной конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы: Состояние и перспективы развития», (г. Бишкек 11-14 сентября 2002 г).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 15 статей в республиканских и международных журналах.

**Структура и объем работы.** Основное содержание диссертационной работы изложено на 181 страницах машинописного текста, иллюстрированного 30 рисунками. Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список используемой литературы, приложение. Список литературы содержит 108 наименований.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ДИССЕРТАЦИИ

**Во Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, представлены основные результаты, показаны их новизна, научная и практическая ценность, кратко изложена структура диссертации и формулируются основные положения выносимые на защиту.

**В первой главе** сделан обзор литературы, посвященной голограммам диффузно-отражающих объектов, представляющей наличие спекл-структуры в поле в плоскости голограммы. Действительно, поле в плоскости голограммы есть результат когерентного сложения вкладов от разных освещенных точек объекта, причем для объектов сколь либо сложной формы эти вклады имеют случайные фазы, разные для разных точек голограммы. Из-за интерференции поле в плоскости голограммы обладает так называемой спекл-структурой, т.е. развитыми случайными пространственными неоднородностями интенсивности и фазы. При этом к результирующему полю

применима центральная предельная теорема теории вероятностей, согласно которой амплитуда суммарного поля будет иметь в пространстве случайный характер и описывается гауссовской статистикой.

Проведен анализ состояния дел в области автоматизации и управление технологическими процессами в производстве голографических изделий.

Во второй главе рассматривается теоретическое и экспериментальное исследование записи Фурье - голограмм при использовании пространственно-модулированных световых волн (рис. 1). На диффузор D, ограниченный диафрагмой D1, слева падает плоская волна с длиной волны  $\lambda$ . На расстоянии  $h_1$  от диффузора располагается линза L с фокусным расстоянием  $f_1$  и транспарант T с записываемой информацией. За линзой и транспарантом на расстоянии  $h_2$  находится регистрирующая среда H.

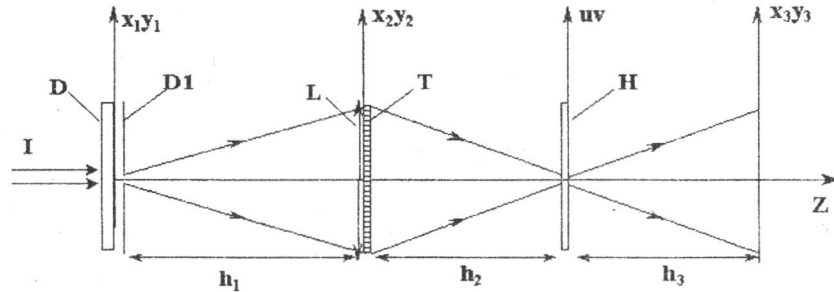


Рис. 1. Метод записи Фурье-голограмм спекл-полем.

D – диффузор; D1 – диафрагма; L – линза; T – транспарант; H – регистрирующая среда.

Поле в плоскости  $x_1y_1$  с учетом действия диффузора D и диафрагмы D1 будет

$$e(x_1, y_1, t) = e(x_1, y_1) \exp(-i\omega t) \quad (2.1)$$

где  $e(x_1, y_1)$  – случайно – амплитудно-фазовое распределение поля.

Комплексная амплитуда волны в плоскости  $x_2y_2$ , после оптической линзы и транспаранта, при использовании приближения Френеля будет

$$e(x_2, y_2) = \frac{-i}{\lambda h_1} \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(h_1 + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2h_1}\right)\right] \cdot \exp\left[-i\frac{\omega}{c} \frac{x_2^2 + y_2^2}{2f_1}\right] \cdot t(x_2, y_2) \quad (2.2)$$

$$\cdot \iint_{x_1, y_1} e(x_1, y_1) \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(-\frac{x_1x_2 + y_1y_2}{h_1} + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2h_1}\right)\right] dx_1 dy_1$$

Комплексная амплитуда волны в плоскости регистрации будет

$$e(u, v) = \frac{-i}{\lambda h_2} \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(h_2 + \frac{u^2 + v^2}{2h_2}\right)\right] \cdot \iint_{x_2, y_2} e(x_2, y_2) \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(-\frac{x_2u + y_2v}{h_2} + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2h_2}\right)\right] dx_2 dy_2 \quad (2.3)$$

Подставляя выражение (2.2) в выражение (2.3), с учетом формулы оптической линзы  $1/h_1 + 1/h_2 = 1/f_1$ , получим выражение описывающее распределение комплексных амплитуд волны в пространственно-частотной плоскости  $uv$ .

$$e(u, v) = -\frac{i}{\lambda^2 h_1 h_2} \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(h_1 + h_2 + \frac{u^2 + v^2}{2h_2}\right)\right] \cdot \iint_{x_1, y_1} e(x_1, y_1) T\left[\frac{\omega}{c}\left(\frac{x_1 + u}{h_1 + h_2}\right), \frac{\omega}{c}\left(\frac{y_1 + v}{h_1 + h_2}\right)\right] \cdot \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(\frac{x_1^2 + y_1^2}{2h_1}\right)\right] dx_1 dy_1 \quad (2.4)$$

где

$$T\left[\frac{\omega}{c}\left(\frac{x_1 + u}{h_1 + h_2}\right), \frac{\omega}{c}\left(\frac{y_1 + v}{h_1 + h_2}\right)\right] = \iint_{x_2, y_2} t(x_2, y_2) \exp\left[-i\frac{\omega}{c}\left(\left(\frac{x_1 + u}{h_1 + h_2}\right)x_2 + \left(\frac{y_1 + v}{h_1 + h_2}\right)y_2\right)\right] dx_2 dy_2 \quad (2.5)$$

Из выражения (2.4) следует, что комплексная амплитуда волны в пространственно-частотной плоскости голограмм  $uv$  представляет собой свертку распределения поля на выходе диффузора  $e(x_1, y_1)$  с функцией Фурье-образа амплитудного пропускания транспаранта  $T(x_1, y_1)$ . Отсюда следует, что в формировании изображения на этапе восстановления площадь голограммы используется эффективно, что приводит к получению максимально возможной дифракционной эффективности голограмм для данного материала.

Рассмотрено, что амплитудная прозрачность полученной голограммы после обработки пропорциональна к интенсивности интерференционной картины. А восстанавливающая волна плоская, волновой вектор которой лежит в плоскости  $uz$  составляя с осью  $z$  угол  $\theta_b$ , т.е.

$$r_b(u, v) = r_{bm} \exp\left[i\frac{\omega}{c} u \cos \theta_b\right] \quad (2.6)$$

При этом комплексная амплитуда волны действительного изображения в плоскости  $uv$  будет

$$e(u, v) = -\frac{r_b(u, v)r(u, v)}{\lambda^2 h_1 h_2} \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(-h_1 - h_2 - \frac{u^2 + v^2}{2h_2}\right)\right] \iint_{x_1, y_1} e^*(x_1, y_1) \cdot \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{2h_1}\right)\right] \cdot T^*\left[\frac{\omega}{c}\left(\frac{x_1 + u}{h_1 + h_2}\right), \frac{\omega}{c}\left(\frac{y_1 + v}{h_1 + h_2}\right)\right] dx_1 dy_1 \quad (2.7)$$

Комплексная амплитуда восстановленной волны в выходной плоскости  $x_3y_3$  будет

$$e(x_3, y_3) = -\frac{i}{\lambda h_3} \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(h_3 + \frac{x_3^2 + y_3^2}{2h_3}\right)\right] \iint_{u, v} e(u, v) \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(-\frac{ux_3 + vy_3}{h_3} + \frac{u^2 + v^2}{2h_3}\right)\right] dudv \quad (2.8)$$

Принимая, что расстояния  $h_2$  и  $h_3$  равны, получаем окончательное выражение комплексной амплитуды восстановленной волны в выходной плоскости

$$e(x_3, y_3) = \frac{i}{\lambda^3 h_1 h_2^2} \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(-h_1 + \frac{x_3^2 + y_3^2}{2h_3}\right)\right] \cdot t^*(x_3, y_3) \iint_{x_1, y_1} e^*(x_1, y_1) \cdot \exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(\frac{x_1x_3 - y_1y_3}{h_1} - \frac{x_1^2 + y_1^2}{2h_1}\right)\right] dx_1 dy_1 \quad (2.9)$$

Из выражения следует, что восстановленная волна совпадает с изображением транспаранта с учётом действия диффузора D и диафрагмы D1. Каждая точка диффузора создает квазиуровень спектр транспаранта со своим фазовым множителем в плоскости голограммы. Следовательно, даже при узком Фурье-спектре транспаранта пятно на голограмме в пространственно-частотной плоскости  $uv$  должно напоминать

оптическое пятно на диффузоре  $D$ , т.е. можно считать, что каждая Фурье-компонента транспаранта формирует в плоскости  $uv$  свое изображение пятна на диффузоре.

Экспериментально исследовались дифракционные характеристики и шумы голограмм относящиеся к схеме точной Фурье голограмм и схеме с использованием диффузора до входной плоскости. На рис.2 приведены графики зависимости ДЭ голограмм от плотности энергии экспонирования для схемы точной Фурье голограмм (кривая 1) и для схемы с использованием диффузора (кривая 2). Из графиков (1) и (2) видно, что кривые (1) и (2) почти совпадают. По этим характеристикам определена оптимальная плотность энергии экспонирования. Проведены исследования по измерению отношения сигнал/шум  $I_c/I_w$  при разных соотношениях интенсивностей опорной и предметной волн. Под интенсивностей сигнальной и шумовой волн понималось интенсивность информационной единицы и информационного нуля в выходной плоскости восстановленного изображения.

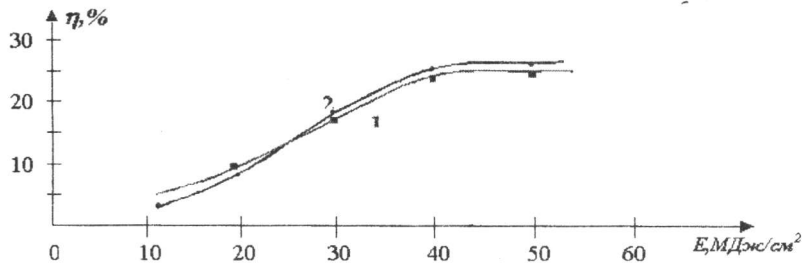


Рис. 2. Зависимости ДЭ голограмм от плотности энергии экспонирования в схеме с точной Фурье голограмм (кривая 1) и в схеме с использованием диффузора (2) для ФПН Omni Dex® 352

На рис.3 приведены графики зависимостей отношения  $I_c/I_w$  от соотношения интенсивностей опорной и предметной волн при записи точной Фурье голограммы (кривая 1) и с изображением диффузора в плоскости голограмм (кривая 2). Из графиков (1) и (2) видно, что при переходе в рабочую точку линейной области характеристической кривой регистрирующей среды, отношения  $I_c/I_w$  заметно увеличивается при использовании спекл-волн по сравнению с точной Фурье голограмм, что приводит к получению изображения хорошего качества.

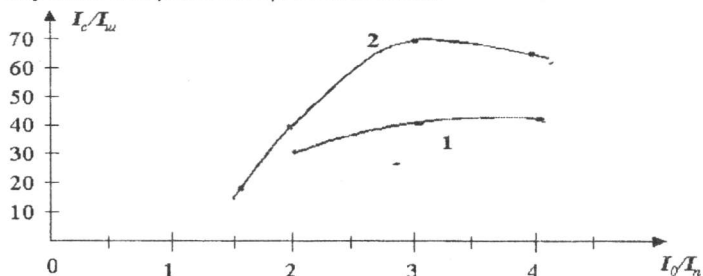


Рис. 3. Зависимости отношения  $I_c/I_w$  от соотношения интенсивностей опорной и предметной волн при записи точной Фурье голограммы (кривая 1) и с использованием спекл-волн (кривая 2) для ФПН Omni Dex® 352.

В заключении отмечен, что исследованная в работе схема записи Фурье голограмм с использованием диффузора обладает определенными преимуществами,

присущими схемам со случайными фазовыми масками. Обеспечивается высокая однородность распределения интенсивности световой волны в плоскости регистрации голограммы при сохранении высокой избыточности и плотности хранения. При этом каждая точка голограммы несет информацию о каждом элементе транспаранта, что обеспечивает высокую надежность и помехозащищенность записанных голограмм.

Высокая однородность распределения светового поля в плоскости регистрации голограмм приводит к получению максимально возможной дифракционной эффективности для данного материала с удовлетворяющим качеством восстановленного изображения. Эта схема более проста технологически по сравнению с схем фазовыми масками.

В третьей главе рассматриваются теоретическое и экспериментальное исследования селективности схемы с дискретной разверткой опорного пучка вокруг предметного пучка по образующей конуса, при котором опорные пучки для каждой развертки имеют различные случайные спекл структуры в плоскости регистрации, а также технология сенсibilизации. Схема записи мультиплексированных голограмм спекл-волной приведена на рис.4.

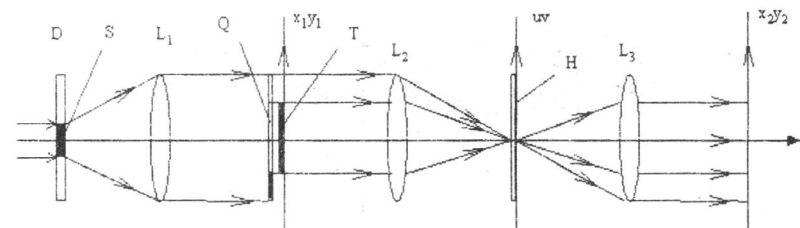


Рис.4. Оптическая схема записи мультиплексированных голограмм спекл-волной.  $D$  – диффузор;  $S$  – освещаемая площадь;  $L_1, L_2, L_3$  – линзы;  $Q$  – маска с окошком;  $T$  – транспарант;  $H$  – регистрирующая среда.

При записи узкий пучок излучения лазера освещает малую площадь "s" диффузора  $D$ . В плоскости  $x_1y_1$ , помещен транспарант  $T$  и кольцеобразная маска  $Q$  с окошком  $q$ . На рис.5а показано размещение транспаранта и маски с окошком. Излучение, прошедшее через область  $q$  играет роль опорной волны. Транспарант  $T$  и маска  $Q$  освещаются плоской спекл-волной. Линза  $L_2$  в своей фокальной плоскости  $uv$  формирует Фурье-образы распределений комплексных амплитуд пропускания транспаранта и области  $q$ . Комплексные спекловые пропускания транспаранта  $T$  и области  $q$  при записи первой голограммы обозначим через  $a_1(x_1, y_1)$  и  $r_1(x_1, y_1-b)$ . Пропускание  $r_1$  окошка  $q$  представляет собой область,

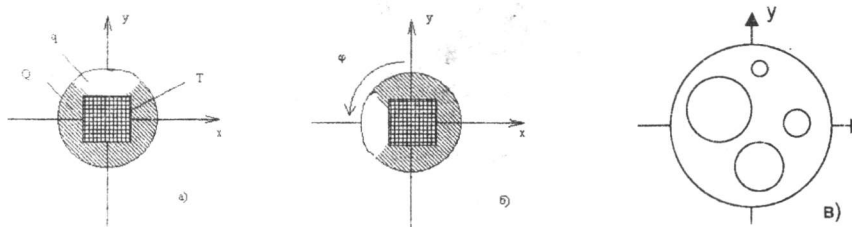


Рис.5. Размещение транспаранта  $T$  и маски  $Q$  с окошком  $q$  и диафрагмы. а) при записи первой голограммы,  $\varphi=0$ . б) при записи второй голограммы,  $\varphi=90^\circ$ . в) диафрагма

центр которой находится не в начале координат  $O$ , а в точке  $x_1=0, y_1=b$ . В плоскости  $uv$  помещена регистрирующая среда, на которой регистрируется картина интерференции фурье-образов  $a_1$  и  $r_1$ .

При записи второй голограммы маска с окошком поворачивается в плоскости  $x_1y_1$  вокруг оси  $z$  на угол  $\varphi$  (рис.5б в нашем случае  $\varphi=90^\circ$ , т.е.  $N=4$ , где  $N$  - число наложенных голограмм). При этом имеем  $a_2(x_1, y_1)$  и  $r_2(x_1+b, y_1)$  в плоскости  $x_1y_1$ .

При записи первой голограммы комплексная амплитуда света в плоскости  $x_1y_1$  имеет вид

$$a_1(x_1, y_1) + r_1(x_1, y_1 - b). \quad (3.1)$$

В плоскость регистрирующей среды  $uv$  комплексная амплитуда волны равна

$$A_1(u, v) + R_1(u, v) \exp(i2\pi vb) \quad (3.2)$$

где  $A_1(u, v)$  и  $R_1(u, v)$  - соответственно фурье-образы  $a_1(x_1, y_1)$  и  $r_1(x_1, y_1)$ .

Для интенсивности имеем

$$I(u, v) = A_1(u, v) A_1^*(u, v) + R_1(u, v) R_1^*(u, v) + A_1(u, v) R_1^*(u, v) \exp(-i2\pi vb) + \\ + A_1^*(u, v) R_1(u, v) \exp(i2\pi vb) \quad (3.3)$$

Амплитудная прозрачность полученной голограммы после обработки является функцией интенсивности. Примем, что обычные для голографической регистрации условия выполняются. В этом случае можно считать, что составляющая амплитудной прозрачности голограмм, ответственная за образование действительного изображения объекта, пропорциональна третьему слагаемому в выражении (3.3). Если осветить голограмму волной с комплексной амплитудой  $R_1(u, v) \exp(i2\pi vb)$ , то комплексная амплитуда волны, соответствующий этому члену, в плоскости  $uv$  пропорциональна

$$E_1(u, v) = R_1(u, v) R_1^*(u, v) A_1(u, v) \quad (3.4)$$

Комплексная амплитуда волны в плоскости  $x_2y_2$  пропорциональна его обратному фурье-образу:

$$e_1(x_2, y_2) = \iint_{uv} R_1(u, v) R_1^*(u, v) A_1(u, v) \exp[-i2\pi(ux_2 + vy_2)] dudv. \quad (3.5)$$

Используя теорему о автокорреляции, можем записать произведение  $R_1(u, v) R_1^*(u, v)$  в виде

$$R_1(u, v) R_1^*(u, v) = \iint_{x_2, y_2} \beta_1(x_2, y_2) \exp[i2\pi(ux_2 + vy_2)] dx_2 dy_2, \quad (3.6)$$

$$\text{где } \beta_1(x_2, y_2) = \iint_{-xy} r_1^*(x, y) r_1(x + x_2, y + y_2) dx dy. \quad (3.7)$$

Тогда  $e_1(x_2, y_2)$  принимает вид

$$e_1(x_2, y_2) = \iint_{uv} \left\{ \iint_{x_2, y_2} \beta_1(x_2, y_2) \exp[i2\pi(x_2 u + y_2 v)] dx_2 dy_2 \iint_{x_2, y_2} a_1(x_2, y_2) \exp[i2\pi(x_2 u + y_2 v)] dx_2 dy_2 \right\} \cdot \\ \cdot \exp[-i2\pi(x_2 u + y_2 v)] dudv \quad (3.8)$$

Используя теорему о свертке имеем

$$e_1(x_2, y_2) = \iint_{xy} \beta_1(x, y) a_1(x_2 - x, y_2 - y) dx dy \quad (3.9)$$

Отсюда видно, что комплексная амплитуда волны в выходной плоскости представляет собой свертку  $a_1(x_2, y_2)$  с функцией автокорреляции пропускания  $r_1(x_2, y_2)$ . Такая свертка дает неискаженное изображение выходного транспаранта  $a_1(x_2, y_2)$ , если автокорреляционная функция  $\beta_1(x_2, y_2)$  представляет собой  $\delta$ -функцию.

При использовании диффузора можно считать, что свет, прошедший через рассеиватель, излучается ансамблем вторичных точечных источников, испускающих сферические волны одинаковой амплитуды но случайной фазы. Каждый из этих источников можно представить в виде произведения  $\delta$ -функции на фазовый множитель:  $\delta(x - x_m, y - y_m) \exp(i\varphi(x_m, y_m))$ . Фурье-образ ансамбля  $M$  таких  $\delta$ -функций который прошел через  $q$  имеет вид:

$$R_1(u, v) = \sum_{m=1}^M \exp[2\pi i(x_m u + y_m v)] \exp[i\varphi(x_m, y_m)] \quad (3.10)$$

Комплексно-сопряженное будет:

$$R_1^*(u, v) = \sum_{n=1}^M \exp[-2\pi i(x_n u + y_n v)] \exp[-i\varphi(x_n, y_n)] \quad (3.11)$$

тогда

$$R_1(u, v) R_1^*(u, v) = M + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \exp[2\pi i((x_m - x_n)u + (y_m - y_n)v)] \cdot \\ \cdot \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \varphi(x_n, y_n))] \quad (3.12)$$

При этом автокорреляция пропускания  $r_1(x_2, y_2)$  имеет следующий вид:

$$\beta_1(x_2, y_2) = M \delta(x_2, y_2) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \delta[x_2 - (x_m - x_n), y_2 - (y_m - y_n)] \cdot \\ \cdot \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \varphi(x_n, y_n))] \quad (3.13)$$

Используя соотношение (3.13), в выходной плоскости имеем следующее распределение комплексных амплитуд

$$e_1(x_2, y_2) = M a_1(x_2, y_2) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M a_1[x_2 - (x_m - x_n), y_2 - (y_m - y_n)] \cdot \\ \cdot \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \varphi(x_n, y_n))] \quad (3.14)$$

Отсюда видно, что величина первого члена в правой части равенства (3.14), который линейно возрастает с числом точечных источников  $M$ , есть изображение выходного транспаранта  $a_1(x_2, y_2)$ , в то время величина функций стоящей под знаком двойной суммы, который дает фон вокруг изображения не зависит от  $M$ . Если интенсивность излучения в плоскости диффузора постоянно, то с увеличением освещаемой площадью "S", т.е. с увеличением числа  $M$ , линейно возрастает комплексная амплитуда волны и площадь фона вокруг изображения в выходной плоскости.

Для определения селективности голограмм в предложенном методе, рассмотрен восстановление первой голограммы при считывании второй голограммы. При этом комплексная амплитуда волны первой голограммы в плоскости  $uv$  пропорциональна

$$E_{12}(u, v) = R_1(u, v) R_2^*(u, v) A_2(u, v) \exp[-i2\pi b(u + v)] \quad (3.15)$$

Комплексная амплитуда волны в плоскости  $x_2y_2$  пропорциональна его обратному фурье-образу

$$e_{12}(x_2, y_2) = \iint_{uv} R_1(u, v) R_2^*(u, v) A_2(u, v) \exp[-i2\pi b(u + v)] \exp[-i2\pi(ux_2 + vy_2)] dudv \quad (3.16)$$

Используя теоремы о корреляции и свертки двух функций имеем

$$e_{12}(x_2, y_2) = \iint_{xy} \beta_{12}(x_2, y_2) a_{12}(x_2 - b - x, y_2 - b - y) dx dy \quad (3.17)$$

$$\text{где } \beta_{12}(x_2, y_2) = \iint_{uv} R_1(u, v) R_2^*(u, v) \exp[-i2\pi(x_2 u + y_2 v)] du dv \quad (3.18)$$

Комплексно-сопряженное фурье-образ пропусканий  $g_2(x_2, y_2)$  имеет следующий вид.

$$R_2^*(u, v) = \sum_{n=1}^M \exp[-2\pi i(x_n u + y_n v)] \exp[i\psi(x_n, y_n)] \quad (3.19)$$

Используя соотношения (3.10) и (3.16), мы можем записать произведение  $R_1(u, v) R_2^*(u, v)$  в виде:

$$R_1(u, v) R_2^*(u, v) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \exp[i2\pi((x_m - x_n)u + (y_m - y_n)v)] \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \psi(x_n, y_n))] \quad (3.20)$$

Тогда с учетом соотношения (3.20) мы можем записать (3.18) в виде:

$$\beta_{12}(x_2, y_2) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \delta[x_2 - (x_m - x_n), y_2 - (y_m - y_n)] \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \psi(x_n, y_n))] \quad (3.21)$$

при этом выражение определяющее комплексные амплитуды волны первой голограммы в выходной плоскости при восстановлении второй голограммы имеет вид:

$$e_{12}(x_2, y_2) = \iint_{xy} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \delta[x_2 - (x_m - x_n), y_2 - (y_m - y_n)] a_{12}(x_2 - b - x, y_2 - b - y) \cdot \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \psi(x_n, y_n))] dx dy \quad (3.22)$$

Отсюда следует, что

$$e_{12}(x_2, y_2) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M a_{12}(x_2 - (x_m - x_n), y_2 - (y_m - y_n)) \cdot \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \psi(x_n, y_n))] \quad (3.23)$$

при  $x_m - x_n \geq b, y_m - y_n \geq b,$

$$e_{12}(x_2, y_2) = 0 \quad \text{при } x_m - x_n < b, y_m - y_n < b \quad (3.24)$$

Из выражений следует, что восстановление первой голограммы в начале координат выходной плоскости  $x_2=0, y_2=0$  не будет. Оно начинает восстанавливаться с

$\frac{a_{12}}{M^2}$  амплитудой, как фон, в точках с координатами  $x_2 - (x_m - x_n), (y_2 - (y_m - y_n))$  при

$x_m - x_n \geq b, y_m - y_n \geq b$ . Условие  $x_m - x_n \geq b, y_m - y_n \geq b$  выполняется тогда, когда величина освещаемой площади "S" диффузора соизмерима с величиной b.

Экспериментальное исследование селективности схемы с дискретной разверткой опорного пучка вокруг предметной с использованием маски с окошком, при котором каждый опорный пучок имеет свое распределение, осуществлялось по измерению зависимости интенсивности дифрагированного поля от пространственного рассогласования структур зарегистрированной опорной и считывающей волн. При этом рассогласование структур происходил за счет поворота маски с окошком вокруг оси Z. На рис.6 приведено зависимости нормированной интенсивности дифрагированной волны от угла поворота  $\varphi$  маски с окошком вокруг оси Z. А также измеряли зависимость интенсивности дифрагированного поля от освещаемой площади "S" диффузора, при постоянной интенсивности излучения в плоскости диффузора. При этом, чем больше освещаемой площади "S", тем ярче становится выходное изображение. На рис.7 приведена зависимость нормированной интенсивности дифрагированного поля от нормированной освещаемой площади "S" диффузора

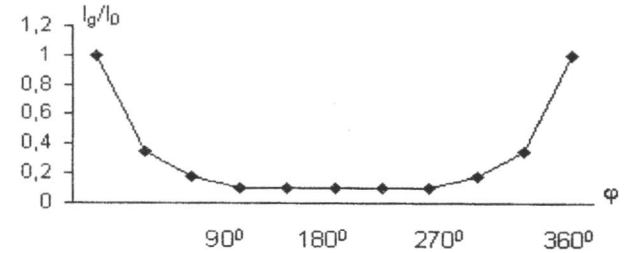


Рис.6. Зависимость нормированной интенсивности дифрагированного излучения  $I_0/I_0$  от угла поворота  $\varphi$  маски с окошком вокруг оси Z.

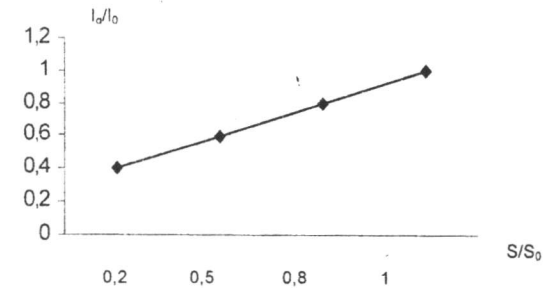


Рис.7. Зависимость нормированной интенсивности дифрагированного излучения  $I_0/I_0$  от нормированной освещаемой площади  $S/S_0$  диффузора.

Рассматривается исследование информационных характеристик записанных спекловых Фурье-голограмм от уровня гиперсенсбилизации и от соотношения интенсивностей объектного и опорного пучков.

С учетом экспозиционных характеристик регистрирующих сред можем записать выражения дифракционной эффективности голограмм в виде:

$$\sqrt{\eta} = s(E - E_s) V H(E_0 - E) \quad (3.25)$$

где,  $s$  – голографическая чувствительность идеального материала,  $E$  – энергия экспозиции,  $E_s$  – величина минимальной экспозиции при котором материал дает отклик без предварительной засветки,  $V = 2\sqrt{R}/(1+R)$  – видность полос,  $R = I_0/I_n$ ,  $I_0$  и  $I_n$  – интенсивность опорного и предметного пучков,  $H(z)$  – функция Хевисайда,  $E_0$  – величина экспозиции, при котором достигается максимальная дифракционная эффективность.

Диапазон экспозиций  $\Delta E$  при котором дифракционная эффективность изменяется от нуля до максимального значения определяется следующим соотношением:

$$\Delta E = E_0 - E_s \quad (3.26)$$

При предварительной обработке величина минимальной экспозиции  $E_s$ , при котором материал дает отклик, уменьшается, т.е. пороговая чувствительность регистрирующей среды увеличивается. При этом минимальная экспозиция  $E_s$  определяется приблизительно следующим соотношением:

$$E_s = E_x - E_{nc}, \quad (3.27)$$

где  $E_{nc}$  – величина энергии предварительной засветки.



С учетом (3.26) и (3.27) выражение дифракционной эффективности голограмм с предварительной засветкой имеет следующий вид:

$$\sqrt{\eta'} = s(E - E_s + E_{nc})VH(E'_0 - E) \quad (3.28)$$

где  $E'_0$  – величина экспозиции максимальной дифракционной эффективности при предварительной засветке, т.е.  $E'_0 = E_0 - E_{nc}$ .

Из сравнения выражений (3.25) и (3.28) следует, что при предварительной засветке регистрирующего слоя уменьшается  $E'_s$ , т.е. увеличивается пороговая чувствительность, а величина максимальной дифракционной эффективности остается прежней.

Исходя из проведенных экспериментальных работ, мы пришли к выводу, что увеличение дифракционной эффективности происходит за счет однородности распределения интенсивности предварительной засветки. А при записи без предварительной засветки, энергия  $E \leq E_s$ , получаемой регистрирующим слоем при экспозиции может служить как предварительная засветка пространственно – неоднородной интенсивности. При этом как бы происходит неоднородная сенсibilизация поверхности регистрирующей среды, что препятствует получению максимально возможной дифракционной эффективности для данного материала.

Исходя из особенностей сенсibilизации можем записать выражения (3.25) и (3.28) в виде:

$$\sqrt{\eta} = \frac{\alpha}{\beta + E_s}(E - E_s)VH(E_0 - E) \quad (3.29)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты пропорциональности.

$$\sqrt{\eta'} = \frac{\alpha}{\beta + E'_s}(E - E'_s)VH(E'_0 - E) \quad (3.30)$$

Максимальные значения дифракционных эффективностей будут

$$\sqrt{\eta_{\max}} = \frac{\alpha}{\beta + E_s} \Delta EV \quad (3.31)$$

$$\sqrt{\eta'_{\max}} = \frac{\alpha}{\beta + E_s - E_{nc}} \Delta EV \quad (3.32)$$

Из выражения (3.32) следует, что максимальное значение дифракционной эффективности при предварительной засветке носителя зависит от величины энергии предварительной засветки  $E_{nc}$ . Максимально возможное значение дифракционной эффективности достигается тогда, когда величина энергии предварительной засветки равна к величине минимальной энергии при котором регистрирующая среда дает отклик, т.е. при  $E_{nc} = E_s$ .

В этом случае отношение максимальных значений дифракционных эффективностей будет

$$\frac{\sqrt{\eta'_{\max}}}{\sqrt{\eta_{\max}}} = \frac{\beta + E_s}{\beta} \quad (3.33)$$

Из выражения (3.33) следует, что величина увеличения дифракционной эффективности при предварительной засветке носителя зависит от величины минимальной энергии  $E_s$  при котором регистрирующая среда дает отклик, т.е. чем больше  $E_s$ , тем не эффективнее используется возможности регистрирующей среды при без предварительной обработки. Отсюда определяется необходимость предварительной обработки.

На рис.8 приведены зависимости дифракционной эффективности спекл – голограммы от энергии экспозиции без сенсibilизации регистрирующего слоя (кривая 1) и с гиперсенсibilизацией (кривая 2). Из этих кривых видно, что при

гиперсенсibilизации носителя опорным пучком происходит существенное увеличение дифракционной эффективности спекл – голограммы.

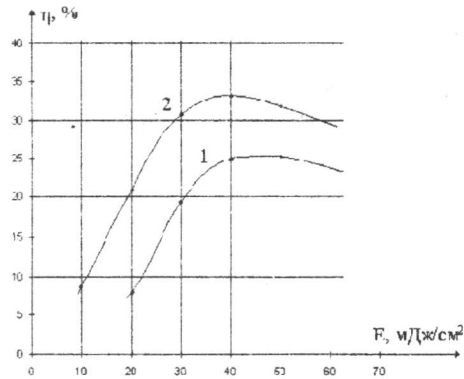


Рис.8. Зависимость дифракционной эффективности от экспозиции для спекл голограмм, записанных в фотополимерном материале OmniDex 352, в случае без предварительной засветки (кривая 1) и с предварительной засветкой (кривая 2).

На рис.9 приведена зависимость дифракционной эффективности голограммы от энергии экспонирования при различных значениях глубины неоднородностей распределения интенсивности предварительной засветки. Из этих кривых видно, что с уменьшением глубины неоднородностей распределения интенсивности предварительной засветки увеличивается дифракционная эффективность голограммы.

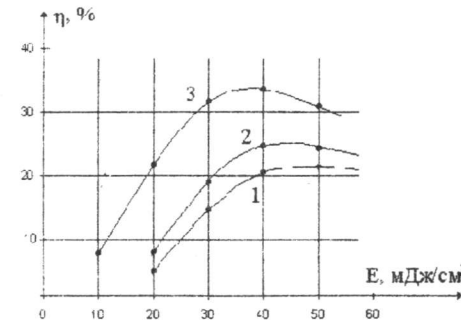


Рис.9. Зависимость дифракционной Эффективности от энергии экспозиции значениях глубины неоднородностей распределения интенсивности предварительной засветки. 1-M=1; 2-M=0,8; 3-M=0.

В заключение следует отметить: мультиплексирование осуществляется при одной установке носителя без всяких изменений. В этом случае вероятность частичного наложения голограмм, равна нулю; на этапе записи ряда голограмм остается неизменной геометрия освещения диффузора; регистрирующая среда не обязательно должно быть толстой, мультиплексирование голограмм можно осуществить и в тонких регистрирующих средах. Кроме того, схема записи проста и надежна.

Экспериментально полученные результаты продемонстрировали улучшение информационных характеристик спекл-голограммы при предварительной засветке регистрирующего слоя. При этом существенно увеличивается дифракционная эффективность голограммы и отношение сигнал/шум, что приводит к улучшению качества восстановленного изображения. Описанная методика предварительной засветки может быть применена для широкого класса регистрирующих сред и различных режимов обработки. В методике сочетаются экспериментальные и

расчетные средства, что позволяет с хорошей достоверностью определить оптимальные параметры записи голограмм.

Четвертая глава посвящена разработке системы автоматического управления экспериментальной установки для изготовления голографических изделий. На основе поставленных задач записи, восстановления и измерения параметров голограмм в производстве голографических изделий и на основе анализа существующих аналогов (прототипов) методов и средств автоматизации предложена система автоматического управления экспериментальной установки для изготовления голографических изделий.

Структурная схема устройства приведена на рис. 10. Устройство состоит из следующих блоков: персональный компьютер PENTIUM-21- предназначен для выдачи управляющих сигналов с LPT порта на цифровой блок и для обработки данных поступающих от приборов, измеряющих интенсивность излучения (аналого-цифровые преобразователи и фотодиоды); цифровой блок-20- управляет всеми узлами устройства; лазер-1 ЛГН-503 ( $Ag^+$ ,  $\lambda = 488$  нм) с мощностью непрерывного излучения до 1 Вт используется в качестве источника света; светоделиитель-2-используется для разделения светового пучка на два эквивалентных компонента; диффузор с диафрагмой-3, диффузор служит для пространственной модуляции светового пучка. Диафрагма служит для ограничения диаметра волны; маска с окошком-4-служит для пропускания предметного и опорного пучков; электромагнитные прерыватели-5 и 19 - служат для прерывание световых излучений; линзы- 6,8,15 используются для направления световых лучей в нужное русло. Транспарант-7- это страница информации, записываемой в регистрирующую среду; фотодиоды- 9,10,12,16 используются для измерения интенсивности светового излучения; регистрирующая среда-11 используются для записи информации; маска-13 для измерения шума; маска-14 для измерения сигнала; экран-17 служит для наблюдения восстановленного изображения транспаранта; зеркала-18,22 используются для отражения светового потока.

Для записи спекл-голограммы без сенсбилизации регистрирующего слоя задействованы следующие элементы данной схемы: лазер 1, светоделиитель 2, диффузор с диафрагмой 3, линза 6, зеркала 18 и 22, регистрирующая среда 11, цифровой блок 20 и компьютер 21. Перед записью все указанные выше элементы переводятся из пассивного состояния в активное, т.е. все элементы устанавливаются в нужное положение. Производитель голографических изделий подключает питание лазера с помощью компьютера программно, начинается запись голограммы. Лазерный луч  $I_0$ , проходя через светоделиитель 2, делится на две части  $I_1$  и  $I_2$ . В данном случае луч  $I_1$  является опорным, а луч  $I_2$ - предметным. Луч  $I_1$  с помощью зеркал 18 и 22 поступает в регистрирующую среду, а луч  $I_2$ , проходя через диффузор с диафрагмой, линзу 6, транспарант 7, линзу 8, поступает на регистрирующую среду. Картина интерференции двух этих волн запишется в регистрирующей среде. Для восстановления записанной голограммы с помощью электромагнитного прерывателя 5 преграждается путь лучу  $I_2$ . Затем регистрирующая среда освещается восстанавливающей волной (идентичной опорной) и восстановленное изображение транспаранта наблюдается на экране 17.

Для записи спекл - голограммы с сенсбилизацией регистрирующего слоя опорным пучком будут задействованы следующие элементы данной схемы: лазер 1; светоделиитель 2; диффузор с диафрагмой 3; линзы 6, 8; транспарант 7; электромагнитные прерыватели 5, 19; цифровой блок 20; компьютер 21. Для сенсбилизации поверхности регистрирующей среды запускается цифровой блок 20; лазер 1; цифровой блок программно устанавливает в нужное положение светоделиитель 2, диффузор с диафрагмой 3, электромагнитный прерыватель 5, линзы 6, 8, транспарант 7. Лазерный луч  $I_0$  проходя через светоделиитель 2 делится на две части  $I_1$  и  $I_2$ . Путь лучу  $I_2$  путь преграждает электромагнитный прерыватель 5 и

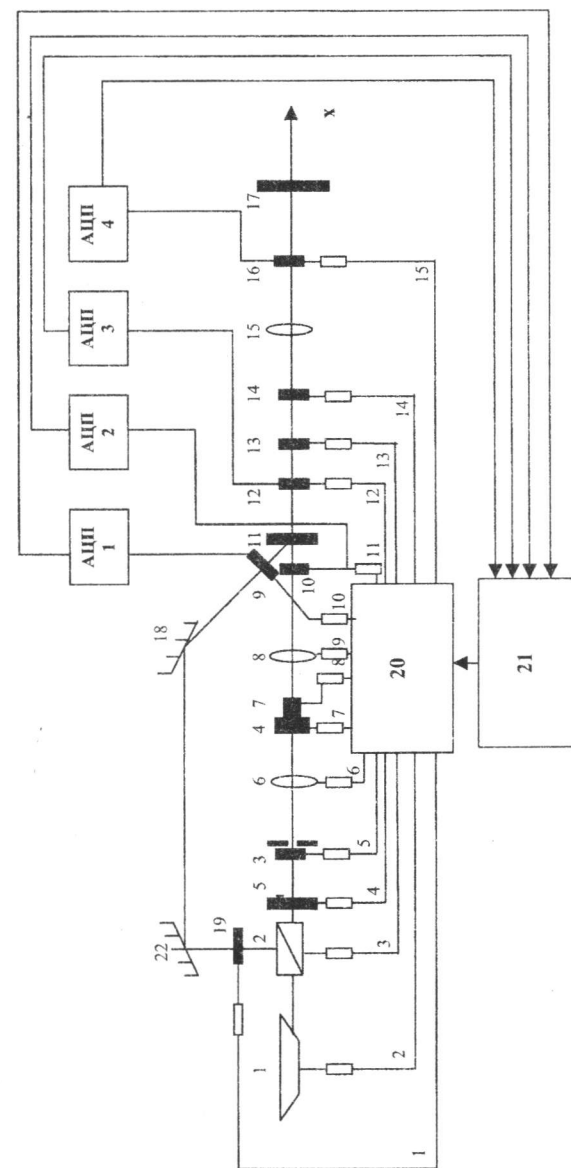


Рис. 10. Структурная схема системы автоматического управления экспериментальной установки для производства голографических изделий: 1-лазер; 2- светоделиитель; 3 – диффузор с диафрагмой и двумя электромагнитными двигателями; 4 – маска с окошком и двумя электромагнитными двигателями; 5 и 19 – электромагнитный прерыватель; 6,8 и 15 – линзы; 7 – транспарант; 9,10,12 и 16 фотодиод; 11 – регистрирующая среда; 13 – маска для измерения шума; 17 – экран; 14 – маска для измерения сигнала; 18 и 22 – зеркала; 20 – цифровой блок; 21 – компьютер.

он дальше не проходит. А луч  $I_1$  с помощью зеркала 22 и 18 сенсibiliзирует поверхность регистрирующей среды 11. На стадии экспонирования электромагнитный прерыватель 5 переводится в пассивное положение и открывается путь лучу  $I_2$ , и он проходит через линзы 6, а затем транспарант 7 и линзу 8. Картина интерференции двух этих волн запишется в регистрирующей среде 11. В данном случае предметной волной является луч  $I_2$ , а опорной волной является луч  $I_1$ . Для восстановления записанной голограммы, прерывается луч  $I_2$ , и регистрирующая среда освещается восстанавливающей волной и на экране 17, будет наблюдаться восстановленное изображение записанной информации.

С помощью данной системы автоматизации и управления можно измерять энергии экспонирования в схеме сточной Фурье-голограммой с использованием диффузора с диафрагмой. Для этого с помощью фотодиодов 9, 10 и АЦП1, АЦП2 измеряем интенсивности световых лучей  $I_1$  и  $I_2$  и их сумму умножаем на время экспонирования и получаем энергию экспонирования голограммы ( $E = (I_{\text{опорной}} + I_{\text{предметной}}) \cdot t_{\text{экспонирования}}$ ). Для получения разных энергий экспонирования будем изменять время экспонирования.

Для измерения такого параметра как дифракционная эффективность используем фотодиоды 9,12 и АЦП 1, АЦП 3. С помощью фотодиода 9 и АЦП 1 измеряем интенсивность восстанавливающей волны, а с помощью фотодиода 12 и АЦП3 измеряем интенсивность дифрагированной волны. Отношение дифрагированной волны к восстанавливающей волне дает дифракционную эффективность голограммы.

Для измерения интенсивности сигнальной волны используем маску 14, линзу 15, фотодиод 16, АЦП 4. Интенсивность луча информационной единицы, проходя через маску попадает к собирающей линзе, а потом к фотодиоду 16 и через АЦП 4 к LPT порту компьютера. Для измерения интенсивности шума используется соответствующая маска 13, линза 15 и фотодиод 16 и через АЦП 4 к LPT порту компьютера. Затем компьютер проводит обработку данных по заданной программе.

С помощью системы автоматизации и управления можно измерять интенсивность опорной и предметной волны. Для измерения интенсивности опорной волны используется фотодиод 9 и АЦП 1, а для измерения интенсивности предметной волны используется фотодиод 10 и АЦП 2. С выхода АЦП 1 и АЦП 2 сигналы поступают на LPT порт компьютера и обрабатываются по заданной программе.

С помощью системы автоматизации и управления можно записать голограмму со спекловыми опорными волнами. В данном случае светоделитель 2 переводится из активного положения в пассивное, т.е. не происходит деления лазерного луча. В этом случае интенсивность луча  $I_0$  освещает диффузор с диафрагмой 3, на выходе получим сферическую волну. Затем сферическая волна освещает линзу 6, после чего волна становится плоской. Это волна освещает маску с окошком, как показано на рисунке 5.

Здесь расположена маска с окошком и транспарант, луч прошедший через окошко является опорным а, луч прошедший через транспарант является предметным. По пути к ним устанавливается собирающая линза 8, и картина интерференции двух этих волн запишется в плоскости регистрирующей среды 11. Для восстановления записанной голограммы регистрирующую среду освещаем восстанавливающей волной, и восстановленное изображение транспаранта наблюдаем на экране 17.

С помощью системы автоматизации и управления реализуется технология мультиплексирования Фурье-голограмм спекл-полем. В данном случае рассматривались записи и восстановления мультиплексированных Фурье-голограмм спекл-полем. Для того чтобы управлять по заданной траектории маску с окошком потребуется два электромеханического двигателя. При записи первой голограммы угол поворота маски с окошком равен нулю, относительно оси "у". При записи второй голограммы с помощью электромеханических двигателей маску с окошком поворачиваем на угол  $90^\circ$  относительно оси "у". Соответственно, данная опорная волна отличается от опорной волны при записи первой голограммы. Когда происходит

запись третьей голограммы, электромеханические двигатели по заданной траектории маску с окошком поворачивают на угол  $180^\circ$  относительно оси "у". В данном случае тоже, опорная волна отличается от опорной волны первого и второго случая. Во время записи четвертой голограммы электромеханические двигатели по заданной траектории поворачивают на  $270^\circ$  маску с окошком относительно оси "у". Здесь тоже, опорная волна имеет свою кодировку, т.е. отличается от предыдущей опорной волны. Из выше сказанного следует, что при записи каждой голограммы, каждый раз опорный пучок по-разному кодируется, т.е. пространственно модулирован по-разному, поэтому для восстановления записанных голограмм, освещаем регистрирующую среду восстанавливающей волной, идентичной опорной.

В зависимости от нормированной интенсивности дифрагированного поля от угла поворота маски с окошком вокруг оси Z, электромеханические двигатели по заданной траектории движения поворачивают маску с окошком от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Причем каждый раз измеряем интенсивность дифрагированной волны и интенсивность опорной волны, а отношение интенсивностей является нормированной интенсивностью дифрагированного излучения.

Для построения такой характеристики как зависимости нормированной интенсивности дифрагированного излучения от нормированной освещаемой площади диффузора будут задействованы следующие элементы предложенной системы: 1- лазер, 3-диффузор с диафрагмой и двумя электромеханическими двигателями, 6,8- линзы, 4- маска с окошком, 7- регистрирующая среда, 10,12- фотодиоды, АЦП1, АЦП3, 20- цифровой блок, 21- компьютер. Диафрагма показана на рис.3.4. В первом случае когда диафрагма первом положении, оба двигателя не задействованы, измеряем интенсивность опорной и дифрагированной волны с помощью фотодиодов 10,12 и АЦП2,АЦП3, данные поступить на компьютер и обрабатываются. Во втором случае оба двигателя задействованы и поворачивает диафрагму по заданной траектории на нужное направление и измеряем интенсивности. Таким образом осуществляем четыре измерения и по поступившим данным компьютер построит нам график зависимостей, что показано на рис. 7.

Как видно из вышесказанного, с помощью данного устройства можно записывать голограмму на любую регистрирующую среду, восстанавливать голограмму а, также измерять все параметры записанной голограммы. Отсюда следует, что данное устройство является универсальным и повышает качество записи и восстановления голограммы.

Разработан цифровой блок с параллельной выдачей информации для экспериментальной установки систем автоматического управления при изготовлении голографических изделий.

Структурная схема цифрового блока во взаимодействии с компьютером представлена на рис.11 и состоит из следующих блоков: А1 - компьютер, А2 - блок согласования, А3 - регистр, А4, А5 - инверторы.

Компьютер осуществляет программное управление работой цифрового блока вырабатывая сигналы управления. При этом, компьютер взаимодействует с цифровым блоком с помощью LPT порта, в котором задействованы следующие сигнальные линии: шины данных Date1-Date8, сигналы "#strobe", "#Init" и "Autofeedxt". Выход LPT порта компьютера подключен ко входу узла согласования. Узел согласования предназначен для согласования цепей с общим коллектором компьютера со входом разработанного цифрового блока. Это достигается введением дополнительного питания к каждому из сигнальных выводов буферного регистра LPT порта. С выхода узла согласования сигналы "#strobe" и "#Init" через инверторы поступают на входы разрешения параллельного регистра. Инверторы предназначены для приведения сигналов "#strobe" и "#Init" к логически верному значению. Такое решение принято для повышения скорости работы программы. Сигналы данных Date1-Date8 с выхода узла согласования поступают на информационные входы регистра.

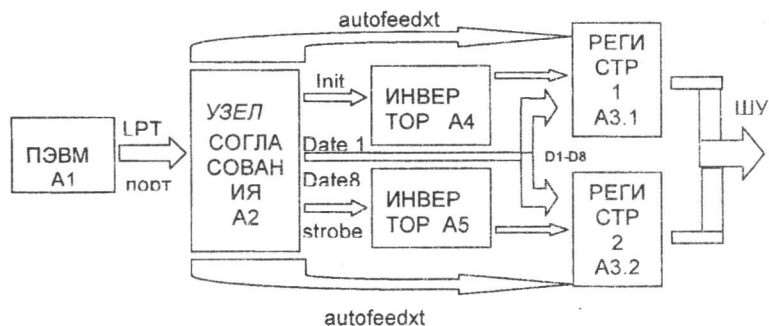


Рис.11. Структурная схема устройства управления

Сигнал "Autofeedxt" с выхода узла согласования поступает на вход "ERD" регистра. Если на вход "ERD" поступает низкий уровень сигнала, то тогда разрешается загрузка и считывание регистра, а если поступает высокий уровень сигнала, то разрешается загрузка, но происходит размыкание выходов, т.е. регистр будет находиться в состоянии «Z». В целом, цифровой блок во взаимодействии с компьютером работает следующим образом: первоначально данные подаются на шины LPT порта, затем они согласовываются по уровню с периферийным устройством, после чего данные будут установлены на выходе узла согласования. Данные для регистрации с выхода узла согласования подаются на информационные входы регистра. По переднему фронту тактового сигнала информация запишется на параллельных входах регистра. Временные диаграммы, показывающие работу данного устройства показаны на рис.12.

Временные диаграммы показаны на примере трех выходов цифрового блока. В момент времени  $t_0$  начинает работать один из выходов, в момент времени  $t_1$  начинает работать второй выход, а в момент времени  $t_2$  начинает работать третий выход.

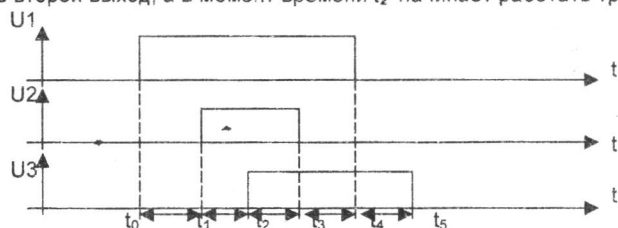


Рис.12. Временные диаграммы

В момент  $t_3$  второй выход закончит свою работу, а выходы 1 и 3 работают. В момент времени  $t_4$  закончит работу первый выход, а третий выход будет ещё работать. В момент  $t_5$  закончит работу третий выход. Так как, управление осуществляется программно, в связи с этим временные диаграммы этого устройства зависят от программы.

В работе разработан и исследован метод синтеза законов управления по осуществлению движения управляемых объектов (в данной системе автоматизации-это электрические двигатели постоянного тока с соответствующими нагрузками на валу) по предписанным программам.

Ставится задача осуществления движения объекта, описываемого уравнением

$$\dot{X} = f(x, u, t) \quad (4.1)$$

где  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  - вектор состояния;  
 $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$  - вектор управления.

По предписанной программе (траектории):

$$\Psi_i(x, t) = 0, \text{ где } i = \overline{1, s} \quad (4.2)$$

Предложен метод синтеза, основанный на концепции обратных задач динамики. Согласно разработанному методу синтеза задача управления заключается в стабилизации движения системы по (4.2). Если система находится вне предписанных траекторий (4.2), обозначается это как ошибка выполнения движения

$$\delta_i = \Psi_i(x, t) \neq 0, \text{ где } i = \overline{1, s} \quad (4.3)$$

Закон управления ищется из условия устранения ошибки  $\delta_i \rightarrow 0$ .

При этом задается динамика устранения ошибки

$$\frac{d\delta_i}{dt} = R_i(\delta_i, t), \text{ где } i = \overline{1, s} \quad (4.4)$$

Так как ошибка это есть ошибка выполнения системой (4.1) движения по предписанной программе (4.2), необходимо (4.4) расписать с учетом системы (4.1). Тогда

$$\frac{d\Psi_i}{dt} = \frac{\partial \Psi_i}{\partial t} + \left( \frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, f(x, u, t) \right) = R_i(\Psi, t) \quad (4.5)$$

Искомый закон управления определяется из алгебраической части (4.5), а именно

$$\frac{\partial \Psi_i}{\partial t} + \left( \frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, f(x, u, t) \right) = R_i(\Psi, t) \quad (4.6)$$

Здесь ("") - символ скалярного произведения;

$R_i(\Psi, t)$  - произвольные функции, удовлетворяющие условию  $R_i(0, t) = 0$ .

Кроме того,  $R_i$  подбираются из заданной динамики  $\delta_i \rightarrow 0$ .

В работе развивается вышеприведенный метод синтеза для решения задачи управления двигателями постоянного тока.

При управлении двигателями применяется принцип якорного управления. В этом случае динамика двигателя с нагрузкой на валу, как объекта управления описывается следующей системой:

$$\begin{cases} u_{я} = i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + K_e w, \\ J \frac{dw}{dt} = K_m i_{я} - M_H, \\ \frac{d\varphi}{dt} = K_p \omega, \end{cases} \quad (4.7)$$

где  $R_{я}$ ,  $L_{я}$ ,  $K_e$ ,  $K_m$  - параметры и конструктивные постоянные;  $u_{я}$ ,  $i_{я}$  - якорное напряжение и сила тока;  $M_H$  - полезный момент нагрузки;  $\varphi$  - угловое положение вала двигателя;  $w$  - угловая скорость;  $K_p$  - коэффициент редуктора;  $J$  - приведенный момент инерции.

В работе применяется векторно-матричный аппарат, запишем (4.7) в виде

$$\dot{X} = Ax + Bu + Dp \quad (4.8)$$

Синтез искомого закона теперь осуществляется на основе (4.7), (4.8) в виде:

$$U = \sum_{i=1}^n C_i V^T \frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, \quad (4.9)$$

где коэффициенты  $C_i$  определяется из системы:

$$\sum_{j=1}^n C_j (V^T \frac{\partial \Psi_j}{\partial x} - V^T \frac{\partial \Psi_j}{\partial x}) = R_i(\Psi, x, t) - (\frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, Ax) - \frac{\partial \Psi_i}{\partial t} \quad (4.10)$$

В диссертации велись исследования по определению (4.9) и (4.10) из условия различных вариантов  $R_i(\Psi, x, t)$ .

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

В приложениях приведены: блок схема программы; распечатки программ.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод достижения однородного распределения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы при использовании спекл - волны, позволяющий получить качественные Фурье - голограммы входных страниц;
2. Разработана технология мультиплексирования Фурье - голограмм на основе свойства автокорреляционной функции световых спекл - полей путем вращения опорного пучка вокруг предметного пучка с применением компьютерной технологии, позволяющая повысить информационную емкость системы голографической памяти,
3. установлена зависимость физико-технических характеристик от глубины неоднородностей распределения интенсивности гиперсенсibilизации и предложен способ записи Фурье - голограмм спекл-полем при гиперсенсibilизации регистрирующего слоя опорным пучком, позволяющие оптимизировать технологию производства голографических изделий;
4. Разработана система автоматического управления экспериментальной установки для изготовления голографических изделий, позволяющая производить запись и считывание информации с возможностью контроля качества голограммы в реальном масштабе времени, а также предложено программное обеспечение для гибкой перестройки системы автоматического управления экспериментальной установки, позволяющее легко перестраивать технологический процесс изготовления голографических изделий и улучшить их качество;

### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Батырканов Ж.И., Токонов А.Т., Абакирова Ж., Ниязалиев М.Т. Управление лазерным лучом в голографических устройствах // Труды международного семинара « Голография и оптическая обработка информации». Бишкек, 1997.-С. 105-107.
2. Батырканов Ж.И., Токонов А.Т., Эстебесов Т.К., Асылбеков Н.С. Цифровая подсистема управления тиристорным регулятором напряжения //Вестник КГНУ, Серия: естественно-технические науки. Выпуск 1. Бишкек. 1997.С.84-87.
3. Батырканов Ж.И., Токонов А.Т. Система автоматического управления мощностью по заданной программе// Сборник трудов международной научной конференции «Традиции и новации в культуре университетского образования», часть II. Бишкек, 1998. – С.197-200.
4. Жумалиев К.М., Токонов А.А., Сагымбаев А.А., Акказиев И.А. Особенности мультиплексирования голограмм в трехмерных фазовых фотополимеризующихся носителях //Материалы Международной научной конференции « Технологии и перспективы современного инженерного

образования, науки и производства », посвященной 45-летию организации ФПИ-КТУ. Бишкек, 1999. – С. 66-71.

5. Жумалиев К.М., Токонов А.А., Сагымбаев А.А., Акказиев И.А. Самоусиление голограмм в объемной регистрирующей среде фирмы DU PONT //Материалы Международной научной конференции « Технологии и перспективы современного инженерного образования, науки и производства », посвященной 45-летию организации ФПИ-КТУ. Бишкек, 1999.- С. 71-77.
6. Батырканов Ж.И., Токонов А.Т. Синтез законов управления на основе принципа компенсации //Вестник КТУ им. И. Раззакова, №1(6). Секция: Автоматика, информатика и связь. Выпуск 1. Бишкек,1999.-С.26-33.
7. Токонов А.Т., Акказиев И.А., Сагымбаев А.А., Аданбаев А.М. Особенности записи спекл-голограмм при сенсibilизации регистрирующей среды// Проблемы управления и информатики. Доклады международной конференции. Бишкек, 2000.- С. 213-217.
8. Токонов А.Т., Акказиев И.А., Сагымбаев А.А. Анализ информационных характеристик и элементной базы голографических запоминающих устройств// Проблемы автоматизации управления: научно-технический журнал / НАН КР, Бишкек, 2000.- С. 202-210.
9. Токонов А.Т. Способ постраничной спекл-овой записи матрицы мультиплексных голограмм// Наука и новые технологии №4. Бишкек, 2000.-С. 91-93.
10. Бримкулов У.Н., Сагымбаев А.А., Токонов А.Т., Нургазиева А.Т. Сравнительный анализ существующих способов записи Фурье-голограмм //Материалы Международной конференции «Телекоммуникационные и информационные технологии. Состояние и развитие проблемы». Бишкек, 2001.-С.359-363.
11. Brimkulov U.N., Tokonov AT., Nurgazieva AT. Multiplexing of the speckle holograms with usage speckle of reference waves// Proceedings of the international seminar « Holography and optical information processing». Bishkek, 2001.- С. 101-105.
12. Brimkulov U.N., Tokonov AT., Sagymbaev A.A., Yanko D.B. Control unit by process of recording of the holograms on photopolymerizable carriers// Proceedings of the international seminar « Holography and optical information processing». Bishkek, 2001. – С. 106-109.
13. Токонов А.Т., Турдалиева А.А. Универсальное устройство управления процессами записи и восстановления голограмм на основе компьютера IBM-PC //Телекоммуникационные и вычислительные системы: состояние и перспектив развития/ Материалы международной конференции, посвященной 20-летию кафедры ЭВМ КТУ-ФПИ и 25-летию научной лаборатории «Оптоэлектроника» академика А.А. Акаева, Бишкек,2002.-С. 31-36.
14. Токонов А.Т., Автоматизация и управление технологическими процессами в голографических установках // Телекоммуникационные и вычислительные системы: состояние и перспективы развития/ Материалы международной конференции, посвященной 20-летию кафедры ЭВМ КТУ-ФПИ и 25-летию научной лаборатории «Оптоэлектроника» академика А.А. Акаева, Бишкек, 2002.-С. 327-332.
15. Бримкулов У.Н., Токонов А.Т. Спекл-волновой метод записи Фурье-голограммы// Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. Выпуск 136. Украина. г. Харьков 2004.-С. 167-171.

## РЕЗЮМЕ

Токонов Акиналы Тургуналиевич. "Разработка метода автоматической записи и технологии мультиплексирования Фурье-голограмм спекл-полем".

Ключевые слова: спекл-волна, Фурье-голограмма, предварительная засветка, технология мультиплексирования, автокорреляционная функция, голографическая память, система автоматизации и управления, алгоритм управления, прикладные программы.

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию метода сужения диапазона изменения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации и способа мультиплексирования Фурье – голограмм спекл-полем, с предварительной засветкой регистрирующего слоя. На основе теоретических и экспериментальных исследований показаны улучшения информационных характеристик Фурье – голограмм и тем самым качество восстановленного изображения при использовании спекл – полей. Разработан технология мультиплексирования Фурье-голограмм на основе свойства автокорреляционной Функции спекл-полей путем вращения опорного пучка вокруг предметного пучка с применением автоматизированного управления.

## THE RESUME

Tokonov Akinaly Turgunaliovich. Development of an automatic recording method and multiplexing technologies of Fourier-holograms by speckle-field".

Key words: a speckle-wave, the Fourier-hologram, pre-light-striking, multiplexing technology, autocorrelation function, holographic memory, system of automation and management, algorithm of management, principle of compensating management, applied programs.

The present dissertational work is devoted to research of a narrowing method of a change range of an information light wave intensity in a registration plane and a way of multiplexing Fourier-holograms by a speckle-field, with pre-light-striking a recording layer. On the basis of theoretical and experimental researches improvements of information characteristics of Fourier-holograms and quality of the reconstructed image when using speckle-fields are shown. The multiplexing technology of Fourier-holograms on the basis of property of autocorrelation function of speckle-fields by rotation of a basic beam around of an object beam with application of automated management is developed.

## РЕЗЮМЕ

Токонов Акиналы Тургуналиевич. «Фурье – голограммаларын спекл - талаалар менен жазуунун автоматикалык методун жана мультиплексирлөө технологиясын иштеп чыгуу».

Негиги сөздөр: спекл-талаа, Фурье-голограмма, алдын ала жарыктандыруу, мультиплексирлөө технологиясы, автокорреляциялык функция, голографиялык эске тутуу, автоматташтыруу жана башкаруу системасы, башкаруу алгоритми, колдонмо программалар.

Бул диссертациялык иште каттоо тегиздигинде информацияны алып жүрүүчү жарык толкундарынын интенсивдүүлүгүнүн өзгөрүү диапазонун азайтуунун жолдору жана каттоо катмарын алдын-ала жарыктандыруу аркылуу, Фурье-голограммаларын спекл-талаалар менен мультиплексирлөөнүн ыкмалары изилденди. Теоретикалык жана эксперименталдык изилдөөлөрдүн негизинде, спекл-талааларын колдонуу, Фурье-голограммаларынын информациялык мүнөздөмөлөрүн, ошондой эле, кайра калыбына келтирилген информациялардын сапатынын жогорулатары көрсөтүлдү. Автоматташтырылган башкаруу системасын колдонуп, спекл-талааларынын автокорреляциялык функциясынын касиеттеринин негизинде Фурье-голограммаларынын мультиплексирлөө технологиясын иштеп чыгуу.

ТОКОНОВ АКИНАЛЫ ТУРГУНАЛИЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОЙ  
ЗАПИСИ И ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ  
ФУРЬЕ - ГОЛОГРАММ СПЕКЛ - ПОЛЕМ

*Автореферат диссертации*

Тех.редактор Керимов К.

Подписано в печать: 6 мая 2004 г., Формат 60x84/16.

Бумага офс. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ОсОО «Басма-Тамга»  
720000, г. Бишкек, ул. Жумабека, 119. тел.: 66-65-63