

**Кыргызский Государственный Технический
Университет имени И. Раззакова**

на правах рукописи
УДК 004'49'02(043'3)

ТОКОНОВ АКИНАЛЫ ТУРГУНАЛИЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СПОСОБА ЗАПИСИ И
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ФУРЬЕ-ГОЛОГРАММ СПЕКЛ- ПОЛЕМ**

05.13.16 – Применение вычислительной техники, математического
моделирования и математических методов в научных исследованиях

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
член. корр. НАН КР
профессор У.Н.Бримкулов

БИШКЕК – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ЗАПИСИ ФУРЬЕ – ГОЛОГРАММ.....	15
1.1. Электродинамическая картина преобразования восстанавливающей опорной волны в объектное поле.....	15
1.2. Запись Фурье – голограммы.....	18
1.3. Анализ процесса записи Фурье-голограмм.....	20
1.4. Метод дефокусировки.....	23
1.5. Метод случайной фазы.....	24
1.6. Спекл волновой метод.....	26
1.7. Сравнительный анализ способов записи Фурье-голограмм.....	27
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1.....	29
ГЛАВА 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СПОСОБ ЗАПИСИ ФУРЬЕ ГОЛОГРАММ СПЕКЛ – ПОЛЕМ.....	30
2.1. Автоматизированный способ записи Фурье-голограмм спекл-полем.....	30
2.2. Автоматизированный способ восстановления изображения входной страницы, записанной спекл-полем.....	36
2.3. Экспериментальное исследование зависимости дифракционной эффективности голограмм от плотности энергии экспонирования.....	38
2.4. Экспериментальное исследование зависимости отношения интенсивностей сигнал/шум от соотношения интенсивностей опорной и предметной волн.....	42
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2.....	45
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СПОСОБА ЗАПИСИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПОРНЫХ СПЕКЛ-ВОЛН С РАЗЛИЧНЫМ ФАЗОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В ПЛОСКОСТИ РЕГИСТРАЦИИ.....	47
3.1. Запись и восстановление мультиплексных голограмм.....	47

3.2. Разработка автоматизированного способа записи мультиплексированных спекл-голограмм с использованием спекловых опорных волн.....	53
3.3. Разработка автоматизированного способа восстановления мультиплексированных спекл – голограмм с учетом действия диффузора.....	58
3.4. Разработка автоматизированного способа исследование селективности спекл-голограмм записанных спекловой опорными волнами.....	61
3.5. Экспериментальное исследование селективности схемы с дискретной разверткой опорного пучка вокруг предметного пучка.....	64
3.6. Автоматизированный способ экспериментального исследование зависимости дифрагированного поля от освещаемой площади диффузора.....	66
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3.....	67
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЕ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ.....	70
4.1. Разработка автоматизированной системы для голографических установок.....	70
4.2. Разработка цифровых блоков для автоматизированного способа записи и мультиплексирования голограмм с последовательным и параллельным управлением.....	76
4.3. Разработка алгоритма управления технологическими процессами в голографических установках.....	82
4.4. Тестирование автоматизированного способа записи и автоматизированного способа мультиплексирования Фурье -голограмм спекл - полем.....	90
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
ЛИТЕРАТУРА	102
ПРИЛОЖЕНИИ.....	110

В Е Д Е Н И Е

Автоматизированный способ записи информации в виде голограмм является наиболее рациональным и выгодным способом хранения информации. Автоматизированный способ записи позволяет реализовать наивысшую плотность и, что самое важное, высокую надежность хранения информации. Голограмма почти не чувствительна к внешним помехам «импульсного характера» - пылинкам, царапинам и др., с которыми наиболее часто приходится сталкиваться на практике. Это связано с тем, что в случае голограммы элементы информации записываются на большей площади фоточувствительного слоя путем их наложения, а не локализуются в отдельных точках фотослоя.

Одно из самых замечательных свойств голограммы состоит в том, что каждый участок голограммы содержит информацию о всем объекте. Это означает, что голограмму можно разрезать на несколько пучков, и каждый из них позволит воссоздать полное изображение объекта.

Альтернативными оптическому методу побитовой записи больших объемов информации являются автоматизированные способы записи голограмм, преимущества которых в большой степени проявляются при увеличении скорости потока и плотности записи данных. Достоинства автоматизированного способа записи проявляются в том, что оно более простым в техническом плане при создании многоканальных систем, следовательно, можно увеличить скорость потока данных. Более низкие требования предъявляются к регистрирующим материалам благодаря повышенной надежности автоматизированного способа записи; снижаются требования к точности изготовления узлов и автоматизированным регулировкам элементов и узлов в голографических устройствах записи и воспроизведения сигналов. Автоматизированные способы записи голографической информации в настоящее время получили значительное

развитие в различных отраслях науки и техники. Автоматизированные способы записи в голографии позволяют реализовать различные вычислительные устройства, в которых выполняются математические операции над информацией, записанной в голограмме. К числу наиболее перспективных направлений автоматизированных способов записи следует отнести оптическую обработку информации, голографическую интерферометрию, применение голографических элементов в оптических системах в целях уменьшения aberrаций последних и в перспективе - создание голографического телевидения и голографических кинофильмов. Все это стимулирует разработку новых эффективных автоматизированных способов записи голографической информации.

Необходимость записывать и хранить большие объемы информации привела к необходимости создания систем памяти, основанных на иных, отличных от магнитных или полупроводниковых принципов записи и хранения информации. Перспективным вариантом решения такой задачи является создание голографических запоминающих устройств (ГЗУ), позволяющих записывать информацию с большой плотностью и хранить ее на длительный срок. При разработке таких систем одной из основных задач является разработка блока записи, которая включает в себя две подзадачи — это 1) исследование физико-технических характеристик и 2) разработка автоматизированных способов записи информации, и разработка устройств, осуществляющих такую запись. Именно в этих двух взаимосвязанных направлениях ведутся сейчас исследования. Однако до сих пор нет автоматизированного способа записи голографической информации, удовлетворяющего существующим потребностям в нужной мере.

В настоящее время, благодаря развитию элементной базы, как, например создание двух координатных одноэлементных акустооптических дефлекторов, волоконно-оптических переключателей, использующих для своей работы оптические сигналы, и оптических элементов в интегральном исполнении

появилась возможность создания автоматизированных способов записи, способных восполнить в какой-то степени существующий пробел и решить указанные задачи.

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке автоматизированного способа записи и восстановления, а также разработке автоматизированной технологии мультиплексирования Фурье–голограмм спекл – полем.

Актуальность темы. Основная проблема, связанная с получением качественных Фурье – голограмм входных страниц, заключается в регистрации интенсивности света, изменяющегося в широком диапазоне. Существуют методы, которые позволяют добиться достаточно однородного распределения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы. В методе дефокусировки плоскость регистрации голограммы смещается от точной Фурье плоскости на небольшое расстояние Δf , причем $\Delta f \ll f$ (где f – фокусное расстояние). Распределение интенсивности информационной световой волны в смещенной плоскости характеризуется большей однородностью. Тем самым удастся 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.

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. При этом дифракционная эффективность для фазовых голограмм достигает 20-24 %, а отношение сигнал/шум повышается до 30 и более. Однако изготовление фазовой маски и согласование ее с транспарантом технологически очень сложно.

Более совершенный метод-метод записи Фурье - голограмм спекл- полем, сохраняет все преимущества метода случайной фазы. Сущность этого способа заключается в установке диффузора с диафрагмой в плоскости x_1y_1 . Лазерный луч, прошедший через диффузор, является пространственно-модулированными световыми волнами. При этом дифракционная эффективность для спекл-голограмм достигает 20-25 %, а отношение сигнал/шум равняется 30 и более.

В связи с тем, что процессы записи и восстановления голограмм, при экспериментальном определении различных характеристик требуют высокоточного позиционирования и программного движения отдельных функциональных элементов системы-все это требует автоматизации вышеуказанных процессов на основе современных компьютерных и программных средств, при котором обеспечивается высокая точность технологических процессов и гибкость при переходе к различным технологическим режимом работы. В связи с этим разработка автоматизированного способа записи Фурье-голограмм с использованием спекл-волн и разработка автоматизированной технологии мультиплексирования Фурье-голограмм спекл-полем имеет актуальный характер.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является: разработка автоматизированного способа записи и восстановления Фурье -

голограмм с использованием спекл-волн, и разработка автоматизированной технологии мультиплексирования Фурье – голограмм спекл-полем;

Задачи исследований:

- анализ существующих методов регистрации качественных Фурье - голограмм входных страниц и выбор перспективного варианта;
- исследование способа автоматизированной записи Фурье - голограмм спекл-полем с применением компьютерных технологий;
- экспериментальное исследование информационных характеристик автоматизированного способа записи Фурье - голограмм спекл-полем.
- разработка и исследование автоматизированной технологии мультиплексирования Фурье- голограмм спекл-полем с применением компьютерных технологий;

Научная новизна результатов исследований заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель и предложена структурная схема автоматизированного способа записи Фурье – голограмм спекл – полем, позволяющие достигать однородного распределения интенсивности информационной световой волны в регистрирующей среде;
2. Разработана математическая модель и предложена автоматизированная технология записи наложенных Фурье-голограмм, использующая свойства автокорреляционной функции световых спекл-полей при вращении опорного пучка вокруг предметного пучка;

Практическая значимость полученных результатов: Практическая ценность работы заключается в том, что при автоматизированной записи Фурье-голограмм спекл-полем достигается высокая однородность распределения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы, при этом сохраняется высокая избыточность и помехозащищенность, что приводит к получению качественных Фурье-голограмм. При автоматизированном способе записи Фурье-голограмм спекл-

полем увеличивается дифракционная эффективность и отношение сигнал/шум. Предложенный автоматизированный способ записи мультиплексированных голограмм на основе свойства спекл-полей создает возможность технологических упрощений при создании голографических систем памяти. Разработанная система автоматизированной записи позволяет повысить качество голографических изделий путем высокоточного позиционирования и программных движений, а разработанный автором пакет прикладных программ дает возможность гибко перестраивать режимы работы системы.;

Экономическая значимость полученных результатов. Применение разработанного метода позволяет улучшить технико-экономические показатели процессе создания голограмм и дает существенную экономию материальных затрат на предприятиях, выпускающих голографические изделия.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Получено аналитические выражения позволяющие эффективно использовать площадь голограммы.
2. Математическая модель и автоматизированная оптическая схема записи спекл-волнового способа регистрации голограмм, позволяющие получить качественные Фурье - голограммы входных страниц.
3. Математическая модель и автоматизированная технология мультиплексирования Фурье-голограмм, использующая свойства автокорреляционной функции световых спекл – полей при вращении опорного пучка вокруг предметного пучка с использованием компьютерных технологий.
4. Разработана система автоматизированного управления экспериментальной установкой для изготовления голографических изделий, позволяющая производить запись и считывание информации с возможностью контроля качества голограммы в реальном масштабе времени. Предложено программное обеспечение для гибкой перестройки системы автоматизированного управления экспериментальной установкой,

позволяющее легко перестраивать технологический процесс изготовления голографических изделий и улучшить их качество;

5. Разработан цифровой блок с параллельной выдачей информации для управления работой периферийных устройств.

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

Научному руководителю член корр. НАН КР, д.т.н., профессору Бримкулову У.Н., принадлежит постановка задачи, отдельные результаты и обсуждение полученных результатов.

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

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях:

1. Международном семинаре «Голография и оптическая обработка информации», посвященный 20-летию лаборатории «Оптоэлектроника», (г. Бишкек, КР, 2-4 сентябрь, 1997г.),
2. Международной конференции «Проблемы управления и информатики», посвященная 40-летию институт автоматизации, (г. Бишкек 19-22 сентября 2000 г.)
3. Международной конференции «Телекоммуникационные и информационные технологии. Состояние и проблемы развития», (г. Бишкек 6-11 июля 2001 г.),
4. Международном семинаре «Голография и оптическая обработка информации» (г. Бишкек 5-7 сентября 2001 г.),
5. Международной конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы: Состояние и перспективы развития», (г. Бишкек 11-14 сентября 2002 г.)
6. Международный межвузовский научно-практической конференции-конкурса научных докладов студентов и молодых ученых «Инновационные технологии и передовые решения», (г. Бишкек, КР, 23-24 мая 2019 года);
7. Международная сетевая научно-техническая конференция, «Интеграционные процессы в научно-техническом и образовательном пространствах», посвященная

65-летию организации ФПИ-КГТУ им. И. Раззакова. (г. Бишкек 16-18 сентября, 2019 г.);

Публикации. По теме диссертации опубликованы 20 статей в республиканских и международных журналах.

Структура и объем работы. Основное содержание диссертационной работы изложено на 125 страницах машинописного текста, иллюстрированного 35 рисунками. Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список используемой литературы, приложение. Список литературы содержит 86 наименований.

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 способом записи Фурье-голограмм. Рассмотрены запись голограммы методом дефокусировки, методом случайной фазы и спекл волновой метод. Проведен сравнительный анализ методов записи Фурье-голограмм и выбран самый лучший способ записи Фурье – голограмм для разработки автоматизированной записи Фурье-голограмм.

Во второй главе рассмотрен автоматизированный способ записи Фурье-голограмм спекл-полем. Для формирования спекл-волны используется система диффузор-линза. При этом получаем достаточно однородное распределение интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы.

При определении комплексной амплитуды информационной световой спекл-волны использовано приближение Френеля. Из полученного выражения, описывающее распределение комплексных амплитуд информационной световой спекл-волны в плоскости регистрации голограмм следует, что комплексная амплитуда спекл-волны в пространственно-частотной плоскости

голограммы 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 используется эффективно, что приводит к получению максимально возможной дифракционной эффективности голограмм для автоматизированного способа.

По полученным выражением комплексной амплитуды восстановленной волны в выходной плоскости для случая, когда опорные и восстанавливающие волны плоские и комплексно-сопряженные между собой следует, что восстановленная волна совпадает с изображением транспаранта с учетом действия, диффузора и диафрагмы. При этом каждая точка диффузора создает квази-фурье спектр транспаранта со своим фазовым множителем в плоскости голограммы. Следовательно, даже при узком Фурье-спектре транспаранта пятно на голограмме в пространственно-частотной плоскости должно напоминать оптическое пятно на диффузоре.

Проведены исследования по измерению отношения сигнал/шум I_c/I_m при разных соотношениях интенсивностей опорной и предметной волн. Под интенсивностями сигнальной и шумовой волн понималось интенсивность информационной единицы и информационного нуля в выходной плоскости восстановленного изображения.

Экспериментальные исследования показали, что схема автоматизированной записи Фурье-голограмм спекл-полем обладает определенными преимуществами, присущими схеме записи Фурье-голограмм спекл-полем. При этом 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 помехозащищенности записанных голограмм. Высокая однородность распределения светового поля в плоскости регистрации голограмм приводит к получению максимально возможной дифракционной эффективности

для автоматизированного способа записи с удовлетворяющим качеством восстановленного изображения который определяется отношением сигнал/шум.

Оптическая схема автоматизированного способа записи более проще технологически по сравнению схем записи спекл-полем.

В главе 3 проведены исследование технологии мультиплексирования голограмм с использованием спекл-поле путем поворота опорного пучка вокруг предметного пучка по образующей конуса траектории, при которой опорные пучки для каждого мультиплексирования имеют свои кодированные состояния.

Теоретически полученное выражение комплексной амплитуды восстановленного изображения в выходной плоскости для первой голограммы означает, что комплексная амплитуда восстановленного изображения в выходной плоскости представляет собой свертку функции комплексно - спеклового пропускания транспаранта с корреляционной функцией опорной и восстанавливающей волн. При этом получаем неискаженное изображение выходного транспаранта, если корреляционная функция опорной и восстанавливающей волн представляет собой δ функцию. Это достигается, когда опорные и восстанавливающие волны абсолютно идентичны, что определяет селективности записанных голограмм.

Из выведенного выражения комплексной амплитуды восстановленного с учетом действия диффузора следует, что при постоянной интенсивности излучения в плоскости диффузора с увеличением освещаемой площади “S” диффузора линейно возрастает величина комплексной амплитуды восстановленного изображения и площадь фона вокруг изображения в выходной плоскости.

Для определения селективности записанных голограмм рассмотрен восстановление первой голограммы при считывании второй голограммы. Из полученного выражения комплексной амплитуды первой голограммы следует

что восстановление первой голограммы в начале координат выходной плоскости $x_2=0$, $y_2=0$ не будет.

Экспериментальное исследование селективности схемы с дискретной разверткой опорного пучка вокруг предметной с использованием маски с окошкой 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 увеличение угла рассогласования с поворотом маски с окошкой от первоначального состояния приводит к резкому падению уровня дифрагированного поля. С увеличением освещаемой площади “S” диффузора, при постоянной интенсивности излучения в плоскости диффузора, ярче становится выходное изображение, т.е. увеличивается уровень интенсивности выходного изображения.

К достоинству автоматизированного способа относятся:

- мультиплексирование осуществляется при одной установке носителя без всяких изменений. В этом случае вероятность того, что голограммы частично належиваются равна нулю;
- на этапе записи ряда голограмм остается неизменной геометрия освещения диффузора;

Четвертая глава посвящена разработке автоматизированной системы и управления производства голографических изделий. На основе теоретически и экспериментально полученных результатов записи, восстановления и измерения параметров голограмм в процессе производства голографических изделий и анализа существующих аналогов средств автоматизированного управления предложена автоматизированная система управления технологическими процессами в производстве голографических изделий. Изготовлен и тестирован лабораторный макет предложенной автоматизированной системы управления технологическими процессами изготовления голографических изделий. Предложен алгоритм управления автоматизированной системы управления.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В приложении приведены: распечатки программ.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ЗАПИСИ ФУРЬЕ-ГОЛОГРАММЫ

1.1. Электродинамическая картина преобразования восстанавливающей опорной волны в объектное поле

Голографические методы обладают большими потенциальными возможностями. Голографическая интерферометрия для дистанционного контроля за деформациями, напряжениями и перемещениями твердых тел; запись, хранение и параллельная оптическая обработка больших массивов информации; голографические линзы Френеля и другие оптические элементы малой толщины и веса для видимого и ИК диапазонов; голографические дисплеи для тренажеров; изобразительная голография и голографическое кино с полной иллюзией реального предмета - вот далеко неполный перечень областей приложения методов голографии [26,67,68,80,85]. Почти во всех приложениях голографии важными параметрами являются: 1) эффективность восстановления голограммой точного поля объекта; 2) качество восстановления, характеризуемое отношением интенсивностей сигнала и искажений. Чтобы определить и оптимизировать эти параметры, необходимо детальное количественное понимание электродинамических процессов, происходящих в регистрирующей среде при записи и считывании голограмм.

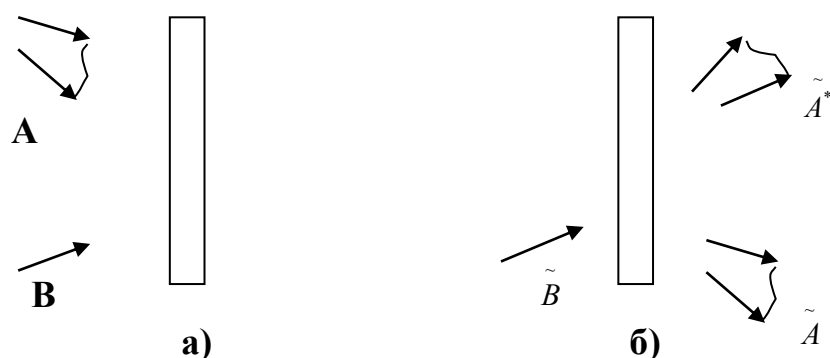


Рис. 1.1. Схемы а) записи голограммы объектным полем A и опорным полем B и б) восстановления поля \tilde{A} с помощью опорной волны \tilde{B} .

Как отмечает Н. Бломберген [16,17], “к нелинейным оптическим явлениям можно в известном смысле отнести и голографию”. Поэтому неслучайно, что математические методы решения электродинамических задач нелинейной оптики и, в особенности метод укороченных уравнений, столь плодотворно развивавшийся Р.В. Хохловым [12,43,44,65,66], помогли существенно продвинуться в решении электродинамических задач голографии.

В ранних работах по голографии [60,61,62,63] основная цель состояла в доказательстве самого факта восстановления волнового фронта. Поэтому сложная электродинамическая картина преобразования восстанавливающей опорной волны в объектное поле заменялась следующим простыми, хотя и достаточными для этой цели, рассуждениями [69,70,71,76]. Пусть поле при записи с комплексной амплитудой $E(r)=A(r)+B(r)$ состоит из двух когерентных друг с другом частей: опорной волны $B(r)$ и объектной волны $A(r)$ - и записывает в среде возмущения, пропорциональные локальной интенсивности $|E(r)|^2=(A+B)(A^*+B^*)$ (рис.1.1). Далее полагается, что при восстановлении таким же опорным полем $B(r)=B$ голограмма работает как транспарант с коэффициентом амплитудного пропускания $t(r)$, линейно связанным с интенсивностью, при записи: $t(r)-t_0=t_1|E(r)|^2$. Учитывая функция $t(r)$ состоит лишь интерференционные слагаемые $A(r) B^*(r) + A^*(r) B(r)$, для восстановленного поля получим:

$$E_{восст}(r) = t_1 A(r)/B^2 + t_1 A^*(r) B. \quad (1.1)$$

Тем самым на выходе из голограммы восстанавливается комплексное поле объектной волны $A(r) \sim A(r)$.

В силу известного принципа Гюйгенса эта волна в пространстве за голограммой неотличима от поля при записи, несущего объемное изображение объекта. В направлении, примерно симметричном по отношению к опорной волне, голограмма восстанавливает так называемое псевдоскопическое, или действительное, изображение, отвечающее комплексно-сопряженной $A(r) \sim A^*(r)$.

При простом рассмотрении по формуле (1.1) возможные искажения (шумы) в восстановленной волне были отброшены с самого начала. Кроме того, линейная зависимость $t-t_0=t_1|E(r)|^2$ заведомо должна нарушаться в том наиболее интересном случае, когда мы хотим получить голограмму с высокой дифракционной эффективностью восстановления объектного поля. Наконец, для фотослоев заметной толщины L (в типичных условиях при $L \geq 10^{-3}$ см) существенна дифракция поля уже внутри голограммы [27,28], и ее действие на падающее поле не описывается в терминах транспаранта с заданным пропусканием. Поэтому для определения дифракционной эффективности голограммы и величины искажений, в общем случае, требуется решать электродинамическую задачу в ее полном объеме.

В модельной ситуации, когда и опорная (В), и объектная (А) волны считаются плоскими волнами с постоянной амплитудой, такая задача была решена еще на заре лазерной голографии [81,82,83] методами, разработанными ранее в теории дифракции света на ультразвуковых волнах и в теории дифракции рентгеновских волн в кристаллах. Возможность перенесения этих методов в голографию была связана с предположением о строгой регулярности синусоидальной голографической решетки.

В подавляющем числе случаев, однако, локальное поведение поля объектной волны $A(r)$ крайне нерегулярно и совершенно не похоже на сам объект. В самом деле, поле $A(r)$ в данной точке голограммы r 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 $A(r)$ в плоскости голограммы обладает так называемой спекл-структурой, т.е. развитыми случайными пространственными неоднородностями интенсивности и фазы [36,78,84]. В отличие от этого среднестатистические характеристики поля $A(r)$ в плоскости голограммы и, в частности, средняя интенсивность $|A(r)|^2$ оказываются практически однородными по всему поперечному сечению, даже

для объекта с явно неоднородной светимостью, например для удаленного от голограммы светового предмета на черном фоне.

Лишь в последние годы была создана достаточно полная теория голограмм спекл-полей, объединяющая электродинамику дифракции и статистику спекл-неоднородностей, появились и первые экспериментальные подтверждения этой теории.

В литературе иногда встречается термин “голограмма диффузного объекта”, предполагающий наличие спекл-структуры в поле непосредственно у объекта. Понятие “голограмма спекл-поля” шире, так как спекл-структура объектного поля в плоскости фотослоя образуется даже для не диффузных по своей природе объектов, таких, как информационный транспарант, слайд с текстом и даже зеркальный объект сложной формы.

1.2. Запись точной Фурье-голограммы

Данные, предназначенные для ввода в голографическое запоминающее устройство, разбиваются на страницы, и каждая страница записывается в виде отдельной голограммы. Таким образом весь массив данных хранится в виде матрицы голограмм, записанных на плоский или объемный носитель. Страницы данных, представленные в двоичном коде, подготавливаются к записи в виде транспаранта, прозрачные отверстия которого соответствуют двоичным единицам. Такой транспарант называется входной страницей.

В реальных голографических запоминающих устройствах (ГЗУ) входная страница формируется устройством набора страниц (УНС), которое представляет собой пространственный матричный модулятор световой волны с электронной схемой управления. УНС осуществляет пространственную модуляцию проходящей или отраженной световой волны по амплитуде, фазе, поляризации или по совокупности этих параметров в соответствии с записываемой информацией. В дальнейшем, под входной страницей мы будем

понимать амплитудный транспарант с прозрачными круговыми отверстиями на непрозрачном фоне, работающий на пропускание.

Входная страница, как правило, записывается по схеме Фурье-голографии, т.е. записывается голограмма Фурье-образа страницы. Запись входной страницы в виде Фурье-голограммы обладает рядом важных достоинств, которые обусловлены двумя основными свойствами преобразования Фурье : Фурье-образ точечного света представляет собой равномерное распределение амплитуд света по всей частотной плоскости; смещение точечного источника в координатной области вызывает только линейный фазовый сдвиг в частотной плоскости. Первое свойство означает, что Фурье-голограмма обладает большой избыточностью хранения, так как информация о каждой точке входной страницы и, следовательно, о каждой двоичной единице распределяется по всей площади записи голограммы. Большая избыточность хранения является одним из важнейших достоинств Фурье - голограмм, обеспечивающим высокую надежность хранения и помехозащищенность против локальных дефектов регистрирующей среды. Фурье - голограмму страницы можно записать на участке малых размеров, благодаря чему достигается высокая плотность записи.

Схема записи Фурье-голограмм входных страниц приведена на рис.2.1. Запись голограммы осуществляется следующим образом. Входная страница освещается монохроматической плоской волной, которая называется объектной. Дифрагированный свет, пространственно-модулированный по амплитуде, падает на Фурье-линзу L_1 , которая формирует в своей задней фокальной плоскости Фурье-образ входной страницы, умноженный на фазовый множитель сферической волны. Линза L_2 , идентичная линзе L_1 , устраняет фазовый множитель. В результате в плоскости регистрации голограммы, распределение комплексных амплитуд информационной световой волны будет пропорционально точному Фурье-образу входной страницы. При этом большая

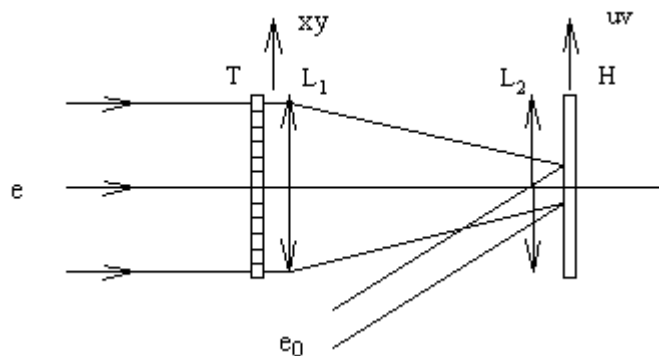


Рис. 1.2. Оптическая схема записи Фурье -голограммы.

T - транспарант; L₁, L₂ – линзы; H - регистрирующая среда; e - объектный пучок; e₀ - опорный пучок.

часть информационной световой волны концентрируется линзой на небольшой площади регистрирующей среды. На этот же участок под определенным углом падает плоская опорная волна, когерентная объектной. Картина интерференции информационной и опорной световых волн регистрируется накопительной средой H, образуя голограмму [5].

1.3. Анализ процесса записи Фурье-голограмм.

Рассмотрим случай, когда входная страница освещается плоской однородной световой волной с амплитудой e_m и амплитудная функция пропускания транспаранта имеет вид

$$t(x, y) = \sum_{n=1}^{M_1} \sum_{m=1}^{M_2} t_1(n, m) \text{circ}(2 \bar{r}_1) \quad (1.2)$$

$$\text{где} \quad \bar{r}_1 = \frac{r_1}{d_1} = \frac{1}{d_1} \left\{ \left[x - \left(n - \frac{M_1 + 1}{2} \right) d_2 \right]^2 + \left[y - \left(m - \frac{M_2 + 1}{2} \right) d_2 \right]^2 \right\}^{1/2}$$

x, y - координаты входной плоскости; $t_1(n, m)$ - функция, характеризующая распределение информации на входной странице; M_1, M_2 - число столбцов и строк страницы входных данных; d_1 - диаметр ячейки транспаранта; d_2 - расстояние между ячейками.

Комплексная амплитуда волны в плоскости **xy**, после транспаранта и оптической линзы **L₁** описывается выражением

$$e(x, y) = e_m t(x, y) \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda f} (x^2 + y^2) \right] \quad (1.3)$$

Комплексная амплитуда световой волны в плоскости регистрации при использовании приближения Френеля будет иметь вид

$$e_1(u, v) = \frac{e_m}{i\lambda f} \iint_{xy} e(x, y) \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (xu + yv) \right] dx dy, \quad (1.4)$$

где **u, v** - пространственные координаты в плоскости регистрации голограммы.

Регистрирующую среду **H** под углом **α** падает плоская опорная волна

$$r = r_m \exp \left(2\pi i \frac{fv}{d_1} \sin \alpha \right) \quad (1.5)$$

В результате интерференции опорной и информационной световых волн, комплексная амплитуда световой волны в плоскости регистрации будет:

$$e(u, v) = e_1(u, v) + r_m \exp(2\pi i \mu v), \quad (1.6)$$

$$\text{где } \mu = \frac{f \sin \alpha}{d_1}.$$

При этом интенсивности интерференционной картины имеют следующий вид

$$I(u, v) = r_m^2 + e_1 e_1^* + e_1 r_m \exp(-2\pi i \mu v) + e_1^* r_m \exp(2\pi i \mu v) \quad (1.7)$$

Первые два члена описывают освещенности, создаваемые опорным и информационным световыми пучками в отдельности. Освещенность, создаваемая опорной световой волной, имеет постоянный уровень на всей площади записи голограммы и служит смещением. Второй член принято называть интермодуляционным, имея в виду, что он обусловлен модуляцией

света от одного участка входной страницы светом от другого участка. Освещенность, соответствующая этому члену, является шумовой составляющей, поэтому желательно так выбрать параметры записи, чтобы вклад этого члена был мал по сравнению с вкладом других членов. Последние два интерференционных члена содержат информацию о входной странице в линейном виде. Эти члены определяют пространственную модуляцию, накладываемую на уровень смещения, создаваемого опорной волной. Они определяют свет, дифрагируемый в изображение входной страницы при считывании информации.

Рассмотрим частный случай, когда все $t_1(\mathbf{m}, \mathbf{n})=1$ без учета интермодуляционной составляющей. Подставляя выражение (1.4) в (1.7) после необходимых упрощений, для M_1 нечетного можем написать выражение интенсивности интерференционной картины в виде

$$I(u, v) = r_m^2 \left[1 - \frac{\pi}{2} \left(\frac{e_m}{r_m} \right) \frac{d_1^2}{\lambda f} \Lambda_1 \left(\pi \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \right) \sin(2\pi \mu \bar{v}) \frac{\sin(\pi \beta_1 M_1 \bar{u})}{\sin(\pi \beta_1 \bar{u})} \cdot \frac{\sin(\pi \beta_1 M_1 \bar{v})}{\sin(\pi \beta_1 \bar{v})} \right] \quad (1.8)$$

$$\text{где} \quad \bar{u} = \frac{d_1}{\lambda f} u; \quad \bar{v} = \frac{d_1}{\lambda f} v; \quad \beta_1 = \frac{d_2}{d_1}.$$

Из выражения (1.8) видно, что распределение интенсивности света в плоскости голограммы сильно неоднородное. Модуляционная составляющая интенсивности изменяется в широком диапазоне, т.е.

$$\Delta I_{\max} = |I - I_{\text{cm}}|_{\max} \leq \frac{\pi}{2} e_m r_m \frac{d_1^2}{\lambda f} M_1^2 \quad (1.9)$$

Характер распределения интенсивности в направлении оси ou качественно аналогичен, но более сложен. Основная доля энергии

информационной составляющей освещенности сконцентрируется в небольшом количестве регулярно расположенных пиков высокой интенсивности [5,51]. Расстояния между этими яркими пиками есть величина, обратная относительному расстоянию между информационными точками на входной странице β_1 .

1.4. Метод дефокусировки

В этом случае плоскость регистрации голограммы смещается от точной Фурье-плоскости на небольшое расстояние Δf , причем $\Delta f \ll f$ (рис1.3.).

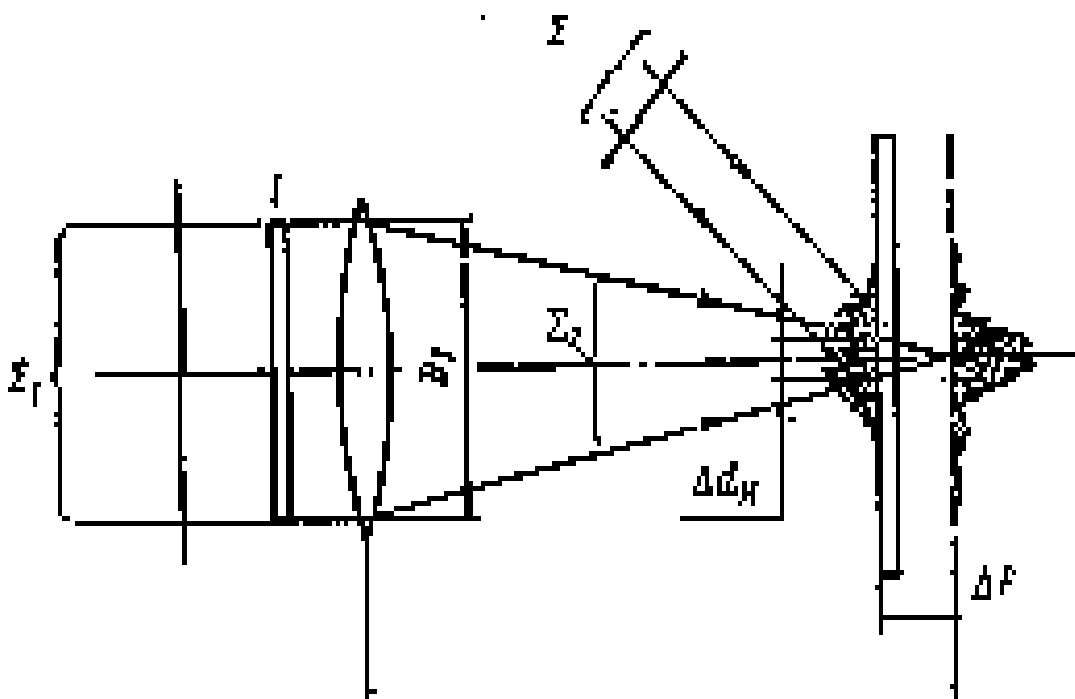


Рис.1.3. Схема записи, расфокусированной Фурье-голограммы.

Распределение интенсивности информационной световой волны в смещенной плоскости характеризуется большей однородностью. Динамический диапазон интенсивности оказывается значительно уже, чем в Фурье-плоскости. Благодаря этому удастся получить качественные амплитудные голограммы с дифракционной эффективностью 1-1,5%. Дифракционная эффективность повышается и достигает до 10-12% после отбеливания. Отношение сигнал/шум в изображении, восстановленном такой

голограммой, равняется 20-30. Экспериментально было показано, что наиболее удовлетворительный результат достигается при $\left| \frac{\Delta f}{f} \right| \approx 0,01$. Наряду с положительными качествами, дефокусировка приводит к следующим нежелательным последствиям: во-первых, снижается избыточность, во-вторых, увеличивается площадь голограммы и, следовательно, понижается плотность записи информации.

Так как центральное пятно дифракционной картины расширяется на величину Δd_H , где $\Delta d_H = (f/F) \left| \Delta f / f \right|$, то размер голограммы, содержащий те же пространственные частоты, что и голограмма, записанная в Фурье-плоскости, становится равным

$$\Delta d_H^I = d_H + \Delta d_H = 2.44\beta_\Sigma(\lambda f / d_I) + ((f / F) \left| \Delta f / f \right|).$$

Следовательно, плотность записи информации уменьшается на величину $(n/n^I) = (d_H^I / d_H)^2 = (1 + (d_I / 2.44\beta_\Sigma \lambda F) \left| \Delta f / f \right|)^{-2}$.

Таким образом, метод дефокусировки позволяет добиться некоторого компромисса между достижением высокой эффективности голограммы и высоких плотности и избыточности регистрации [5].

1.5. Метод случайной фазы.

Более совершенный метод, позволяющий добиться высокой однородности распределения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы при сохранении высокой избыточности и плотности хранения, был предложен К.Беркхартом. Существо этого метода заключается в дополнительной модуляции фазы световых лучей, проходящих через транспарант входных данных, по случайному закону - закону равной вероятности. Данная схема записи приведена на рисунке 1.4. Это приводит к случайному распределению фаз световых волн в плоскости регистрации, в результате чего распределение интенсивности интерференционной картины принимает значительно более однородный характер.

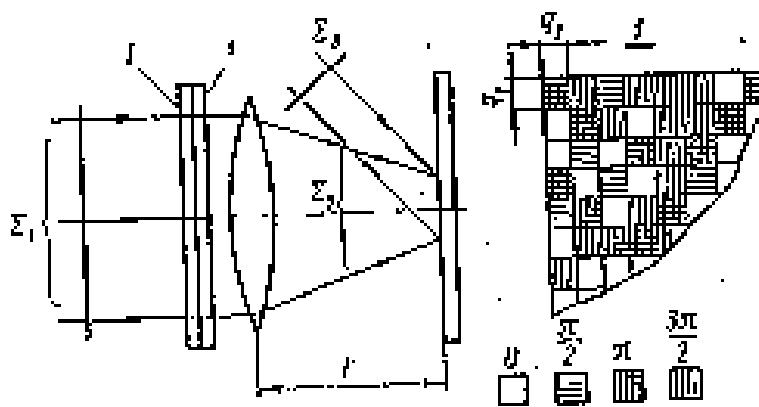


Рис.1.4. Схема записи Фурье-голограммы при использовании маски случайной фазы. 1-четырёхуровневая фазовая маска.

Об эффективности метода случайной фазы можно судить путем сравнения Фурье-голограмм одной и той же входной страницы, полученных соответственно без использования и с использованием маски случайной фазы. Практически модуляция фазы осуществляется с помощью прозрачной маски со случайным равновероятным распределением нескольких уровней фаз из промежутка $[0, 2\pi]$, которая приводится в контакт со входной страницей. Фазовая маска имеет столько же ячеек, сколько информационных точек на входной странице, поэтому на каждую информационную точку приходится своя ячейка, осуществляющая сдвиг фазы проходящего светового луча на величину φ_{nm} ($0 \leq \varphi_{nm} < 2\pi$). Очевидно, что 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.

Так как фотоприемники реагируют только на интенсивность, становится ясным, что распределение фаз входных световых лучей может быть самым произвольным. Единственная цель состоит в достижении максимальной однородности распределения интенсивности света в плоскости регистрации. Запись голограммы при использовании маски случайной фазы производится точно в Фурье-плоскости, поэтому реализуется максимальная избыточность, а размер голограммы ограничивается лишь дифракционными явлениями.

Дифракционная эффективность Фурье-голограмм, полученных данным методом, достигает 20-24% (для фазовых голограмм, т.е. в два раза выше эффективности аналогичных голограмм, полученных по методу дефокусировки). Отношение сигнал/шум в изображении, восстановленном с помощью таких голограмм, равняется 30 и более (доходит до 100).

Метод случайной фазы имеет также ряд практических преимуществ по сравнению с дефокусировкой, в частности, упрощает процесс получения голограммы, снижает требования к качеству формирующих линз. Главное же преимущество указанного метода состоит в том, что он позволяет получить Фурье-голограммы высокой эффективности с сохранением максимальной избыточности и плотности хранения информации, характерной для Фурье - голограмм, записанных точно в Фурье-плоскости [5].

Однако изготовление фазовой маски и согласование ее с транспарантом технологически очень сложны.

1.6. Спекл волновой метод.

В спекл волновом методе сужения диапазона изменения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы, для формирования спекл волны используется система диффузор линза. При этом получаем достаточно однородное распределение интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы.

Спекл-волновой метод записи Фурье – голограмм спекл-полем представлена на рисунке 1.5.

Рассмотрим работу данной схемы:

- луч лазера **I** поступает на светоделитель и делиться на **I₁** опорную и **I₂** предметную волну;
- на диффузор, ограниченный диафрагмой, слева падает плоская предметная волна **I₂** с длиной волны λ ;

- на расстоянии h_1 от диффузора с ограниченной диафрагмой располагается линза с фокусным расстоянием f_1 и транспарант T с записываемой информацией. За диффузором с ограниченной диафрагмой сферическая волна освещает линзу и транспарант;
- за линзой и транспарантом на расстоянии h_2 находится регистрирующая среда. Далее предметная волна проходя линзу и транспарант поступает на регистрирующую среду;
- опорная волна I_1 отразившись, от зеркал 11 и 12 поступает на регистрирующую среду;
- интерференция двух волн запишется плоскости регистрирующей среды.

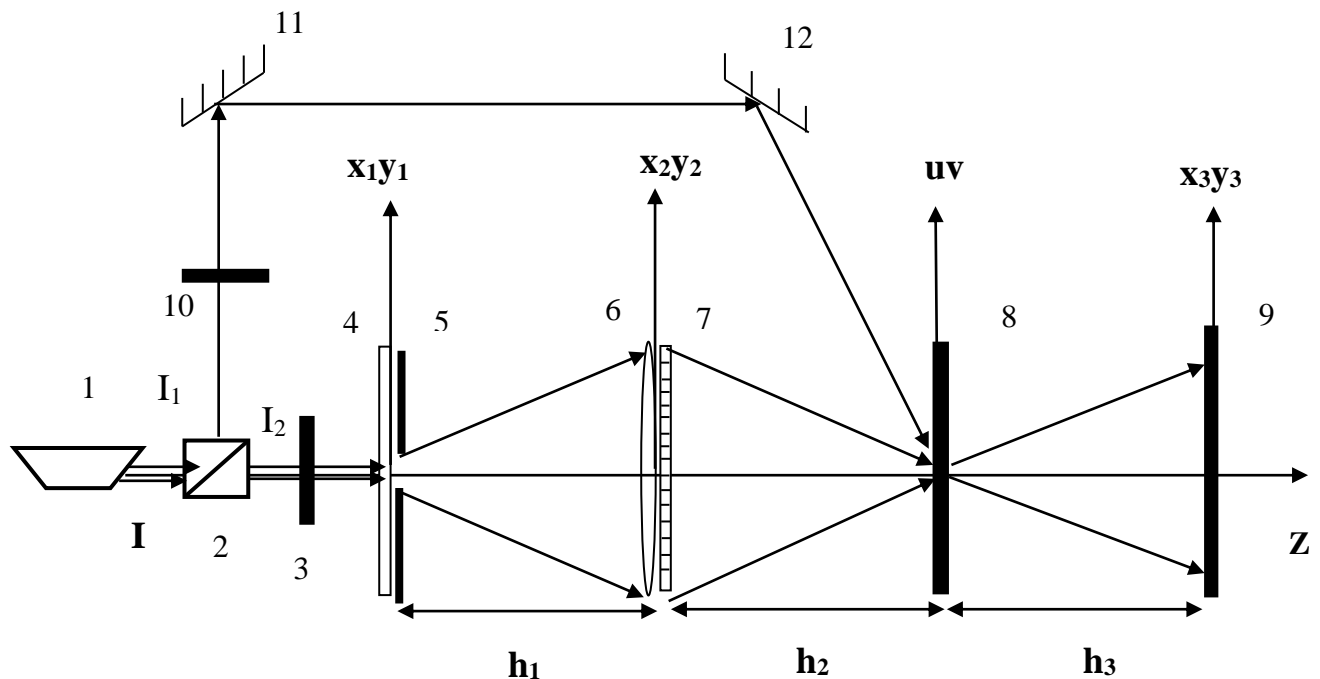


Рис. 1.5. Схема записи Фурье - голограмм при использовании пространственно – модулированных световых волн: 1-лазер; 2-светоделитель; 3,10-прерыватели; 4-диффузор; 5- диафрагма; 6 – линза; 7 – транспарант; 8 – регистрирующая среда; 9-экран; 11,12- зеркала.

Оптическая схема данного метода более проще технологически по сравнению со схемой со случайными фазовыми масками [8,55].

1.7. Сравнительный анализ способов записи Фурье-голограмм

Исходя из выше сказанного следует что из всех методов записи Фурье-голограмм, самым благоприятным является метод записи Фурье-голограмм спекл-полем [2,3,55]. Ниже в таблице 1.1 приведена сравнение методов записи Фурье-голограмм [1]. Например, при разработке голографических запоминающих устройств большой емкости представляется целесообразным производить запись информации на голографическую ленту. В этом случае требуется обеспечить достаточно высокую дифракционную эффективность голограмм и надежную защищенность от механических повреждений записанной информации. Так как в данном методе возможно большая избыточность, высокая надежность, а также информацию можно записать на участке малых размеров, благодаря чему достигается высокая плотность записи информации. В таблице 1.1 приведены некоторые характеристики методов записи Фурье-голограмм. В связи с этим для разработки автоматизированного способа записи и автоматизированной технологии мультиплексирования Фурье-голограмм спекл полем выбираем метод записи Фурье-голограмм спекл-полем.

Таблица 1.1- Приведены характеристики методов записи Фурье-голограмм.

Способ записи Фурье - голограмм	Способ дефокусировки	Способ маски случайной фазы	Спекл-волновой способ
Дифракционная эффективность	10 ÷ 12%	20 ÷ 24%	30 ÷ 35%
Отношение сигнал/шум	20÷30	20÷100	60÷75
технологичность	проще	сложная	проще
Избыточность	низкая	высокая	высокая
плотность хранения	Низкая	высокая	высокая

Таким образом, представляется перспективным разработка автоматизированного способа записи и автоматизированной технологии мультиплексирования Фурье-голограмм спекл-полем.

ВЫВОД К ГЛАВЕ 1

1. В методе дефокусировки плоскость регистрации голограммы смещается от точной Фурье-плоскости на небольшое расстояние Δf , причем $\Delta f \ll f$. Благодаря этому удастся получить качественные амплитудные голограммы с дифракционной эффективностью 10-12%. Отношение сигнал/шум в изображении, восстановленном такой голограммой, равняется 20-30. Наряду с положительными качествами, дефокусировка приводит к следующим нежелательным последствиям: во-первых, снижается избыточность, во-вторых, увеличивается площадь голограммы и, следовательно, понижается плотность записи информации.

2. Метод случайной фазы имеет также ряд практических преимуществ во сравнение с дефокусировкой, в частности, упрощает процесс получения голограммы, снижает требования к качеству формирующих линз. Главное же преимущество указанного метода состоит в том, что он позволяет получить Фурье-голограммы высокой эффективности с сохранением максимальной избыточности и плотности хранения информации, характерной для Фурье - голограмм, записанных точно в Фурье-плоскости. Однако изготовление фазовой маски и согласование ее с транспарантом технологически очень сложны.

3. Более совершенный метод - метод записи Фурье - голограмм спекл- полем, сохраняет все преимущества метода случайной фазы. Сущность этого способа заключается в установке диффузора с диафрагмой в плоскости x_1y_1 . Лазерный луч, прошедший через диффузор, является пространственно-модулированными световыми волнами. При этом дифракционная эффективность для спекл - голограмм достигает 20-25 %, а отношение сигнал/шум равняется 30 и более.

4. Из сравнении методов записи фурье-голограмм видно, что, метод записи фурье-голограмм спекл-полем является самым рентабельным. Исходя из выше сказанного следует что для разработки автоматизированного способа записи выбираем метод записи фурье-голограмм спекл-полем.

ГЛАВА 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СПОСОБ ЗАПИСИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУРЬЕ ГОЛОГРАММ ПРОСТРАНСТВЕННО МОДУЛИРОВАННЫМИ СВЕТОВЫМИ ВОЛНАМИ

2.1. Разработка автоматизированного способа записи Фурье-голограмм спекл-полем.

Разработка автоматизированного способа записи и восстановления голограмм играет важную роль в современных голографических технологических системах. Автоматизированный способ записи и восстановления голограмм включают улучшение качества голографического изделия, уменьшение потребления энергии, минимизацию затрат, повышение уровней безопасности.

Применение компьютерной техники, обладающей большим быстродействием, гибкостью логики, значительным объёмом памяти, послужили основой для разработки автоматизированного способа записи и восстановления голограмм.

Автоматизированный способ записи и восстановления голограмм — это комбинация гибридных схем, где присутствует оператор, компьютерная техника и электронные устройства, призванная обеспечивать автоматизированный сбор и обработку информации, необходимый для оптимизации процесса управления. В отличие от автоматических систем, где человек полностью исключён из контура управления, автоматизированный способ записи предполагает активное участие человека в контуре управления, который обеспечивает необходимую гибкость и адаптивность автоматизированного способа записи и восстановления голограмм.

Разработанный автоматизированный способ записи Фурье-голограммы входной страницы, которая должна четко восстановить изображение входной

страницы при считывании. Но точное восстановление изображения входной страницы возможно только в том случае, когда амплитудное пропускание готовой голограммы линейно зависит от интенсивности интерференционной картины [9,18,21].

В Фурье - голограммах, полученных обычными методами, интенсивность интерференционной картины изменяется в широких пределах, принимая максимальные значения в центральной ее части. Это препятствует получению голограммы с амплитудным пропусканием, линейно зависящим от интенсивности картины, в связи с отсутствием регистрирующих сред с таким большим динамическим диапазоном.

Одним из основных методов относительного выравнивания интенсивности во всех участках голограммы является известный метод – метод спекл-волновой записи Фурье-голограмм [72,75,79], сущность которого заключается в дополнительной модуляции фазы световых волн, проходящих через систему диффузор-линза.

Однако известные способы не обеспечивают высокоточного позиционирования и программного движения отдельных функциональных элементов системы и гибкость перехода к различным технологическим режимом работы. Нужно отметить, что известные схемы обладают крупными недостатками при записи большого числа голограмм на носителе. Исходя из этих недостатков, исследование автоматизированного способа записи Фурье голограмм с использованием пространственно - модулированных волн является актуальной.

Предложена структурная схема автоматизированного способа записи и восстановления Фурье-голограмм спекл-полем на фотополимеризующихся носители, где реальная длительность процессов записи и восстановления голограмм выводится на монитор компьютера.

Структурная схема разрабатываемого автоматизированного способа записи и восстановления голограмм приведена на рис. 2.1.

Устройство состоит из следующих блоков: лазер-1 ЛГН-503 (Ar^+ , $\lambda = 488 \text{ нм}$) с мощностью непрерывного излучения до 1 Вт используется в качестве источника света; светоделитель-2 используется для разделения светового пучка на два эквивалентных компонента;

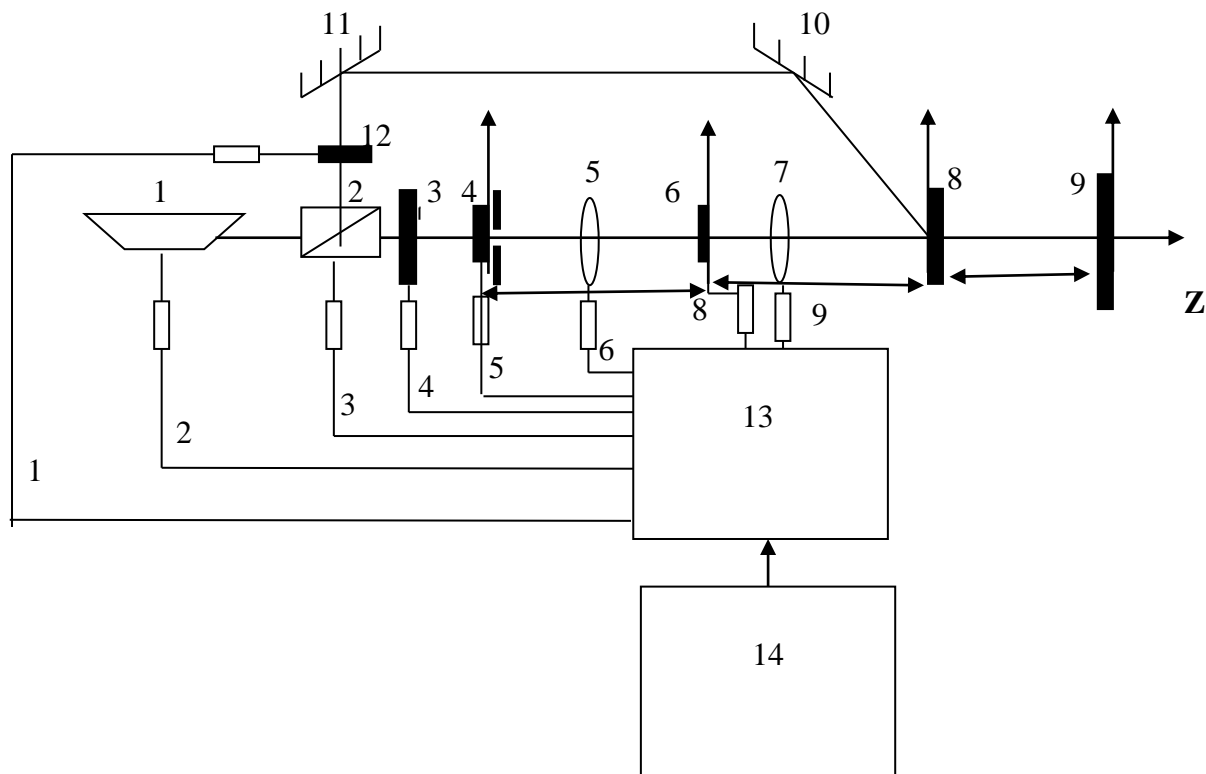


Рис.2.1. Автоматизированный способ записи Фурье-голограмм пространственно-модулированными световыми волнами: 1-лазер; 2- светоделитель; 3 и 12 – электромагнитные прерыватели; 4 – диффузор с диафрагмой; 5 и 12 – линзы; 6 – транспарант; 8 – регистрирующая среда; 9 – экран; 10 и 11 – зеркала; 13 – цифровой блок; 14 – компьютер.

электромагнитные прерыватели-3 и 12 - служат для прерывание световых излучений; диффузор с диафрагмой-4, диффузор служит для пространственной модуляции светового пучка; линзы- 5,7 используются для направления световых лучей в нужное русло; транспарант-6 это страница информации, записываемой в регистрирующую среду; регистрирующая среда-8 используется для записи информации; экран-9 служит для наблюдения восстановленного изображения транспаранта; зеркала-10, 11 используются для отражения светового потока; цифровой блок-13 управляет

всеми узлами устройства; компьютер – 14 предназначен для выдачи управляющих сигналов с LPT порта на цифровой блок.

Рассмотрим принцип работы системы автоматизированной записи и восстановления Фурье-голограмм спекл-полем [48,52]. В начале все элементы данного устройства находятся в пассивном состоянии, т. е. они не задействованы. Для записи спекл-голограммы без сенсбилизации регистрирующего слоя задействованы следующие элементы данной схемы: лазер 1, светоделитель 2, диффузор с диафрагмой 4, линза 5 и 7, зеркала 10 и 11, регистрирующая среда 8, цифровой блок 13 и компьютер 14, электромагнитные прерыватели-3 и 12, транспарант 6, регистрирующая среда 8, экран 9, зеркала 10 и 11, [22,50]. Перед записью все указанные выше элементы переводятся из пассивного состояния в активное, т.е. все элементы устанавливаются в нужное положение. Для записи голограмм подключается питание лазера с помощью компьютера программно, начинается запись голограммы. Лазерный луч I_0 , проходя через светоделитель 2, делится на две части I_1 и I_2 . В данном случае луч I_1 является опорным, а луч I_2 – предметным. Поле в плоскости x_1y_1 с учетом действия диффузора и диафрагмы 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.

Луч I_1 с помощью зеркал 10 и 11 поступает в регистрирующую среду, а луч I_2 , проходя через диффузор с диафрагмой, оптическую линзу 5, транспарант 6, оптическую линзу 7, поступает на регистрирующую среду. Комплексная амплитуда волны в плоскости x_2y_2 , после оптической линзы и транспаранта, при использовании приближения Френеля будет

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

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

Картина интерференции двух этих волн запишется в регистрирующей среде.

Комплексная амплитуда волны в плоскости регистрации будет

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

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 .

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

где

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

Из выражения (2.4) следует, что комплексная амплитуда волны в пространственно - частотной плоскости голограмм uv представляет собой свёртку 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.

Рассмотрен случай, когда опорная волна I_1 представляет собой плоскую волну, волновой вектор, который лежит в плоскости uz составляя угол с осью z . При этом для комплексной амплитуды опорной волны в плоскости uv имеем

$$r(u, v) = r_m \exp \left(i u \frac{\omega}{c} \cos \theta \right) \quad (2.6)$$

При этом интенсивность интерференционной картины имеет следующий вид

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

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

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

Первое слагаемое в этом выражении представляет собой постоянную составляющую, обусловленную опорной волной. Второе слагаемое является шумовой составляющей, дающий при последующей восстановлении интермодуляционное изображение входной страницы. Желательно, чтобы вклад этой составляющей был значительно меньше вклада двух последних слагаемых, описывающих распределение комплексных амплитуд света, диафрагмируемых в нужные сопряженные изображения входной страницы.

Для записи спекл - голограммы с сенсibilизацией регистрирующего слоя опорным пучком будут задействованы следующие элементы данной схемы: лазер 1; светоделитель 2; диффузор с диафрагмой 4; оптические линзы 5, 7; транспарант 6; электромагнитные прерыватели 3, 12; цифровой блок 13; компьютер 14. Для сенсibilизации поверхности регистрирующей среды запускается цифровой блок 13; лазер 1; цифровой блок программно устанавливает в нужное положение светоделитель 2, диффузор с диафрагмой 4, электромагнитный прерыватель 5, линзы 5, 7, транспарант 6. Лазерный луч I_0 проходя через светоделитель 2 делится на две части I_1 и I_2 . Путь лучу I_2 путь преграждает электромагнитный прерыватель 3 и он дальше не проходит. А луч I_1 с помощью зеркала 10 и 11 сенсibilизирует поверхность регистрирующей среды 8. На стадии экспонирования электромагнитный прерыватель 3 переводится в пассивное положение и открывается путь лучу I_2 , и он проходит через линзы 5, а затем транспарант 6 и линзу 7. Картина интерференции двух этих волн запишется в регистрирующей среде 8. 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 9, будет наблюдаться восстановленное изображение записанной информации. Алгоритм управления записью автоматизированного

способа записи с предварительной засветкой и без предварительной засветки регистрирующего слоя приведена в главе 4.

2.2. Автоматизированный способ восстановления изображения входной страницы записанной спекл-волной

Для восстановления записанной голограммы с помощью электромагнитного прерывателя 3 преграждается путь лучу I_2 . Затем регистрирующая среда освещается восстанавливающей волной (идентичной опорной) и восстановленное изображение транспаранта наблюдается на экране 9.

С помощью предложенного автоматизированного способа записи Фурье-голограмм спекл-полем (рис.2.1), нам удалось осуществить автоматизированную линейную запись амплитудной Фурье-голограммы спекл-полем. Считаем, что амплитудная прозрачность полученной голограммы после обработки пропорциональна интенсивности интерференционной картины [15]. Восстанавливающая волна плоская, волновой вектор который лежит в плоскости uz (рис.2.1) составляя с осью z угол θ_b , т.е.

$$r_b(u,v)=r_{bm}\exp\left[i\frac{\omega}{c}u\cos\theta_b\right] \quad (2.8)$$

При этом комплексная амплитуда волны действительного изображения в плоскости uv будет

$$e(u,v)=-\frac{r_b(u,v)r(u,v)}{\lambda^2 h_1 h_2}\exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(-h_1-h_2-\frac{u^2+v^2}{2h_2}\right)\right]\int_{x_1} \int_{y_1} e^*(x_1,y_1)\exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(-\frac{x_1^2+y_1^2}{2h_1}\right)\right] \cdot T^*\left[\frac{\omega}{c}\left(\frac{x_1}{h_1}+\frac{u}{h_2}\right),\frac{\omega}{c}\left(\frac{y_1}{h_1}+\frac{v}{h_2}\right)\right]dx_1dy_1 \quad (2.9)$$

В том случае, когда восстанавливающая волна комплексно-сопряженно к опорной, т.е. $r_b(u,v)=r^*(u,v)$ имеем

$$e(u,v)=-\frac{r}{\lambda^2 h_1 h_2}\exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(-h_1-h_2-\frac{u^2+v^2}{2h_2}\right)\right]\int_{x_1} \int_{y_1} e^*(x_1,y_1)\exp\left[i\frac{\omega}{c}\left(-\frac{x_1^2+y_1^2}{2h_1}\right)\right]$$

$$\cdot \int \int_{x_2 y_2} t^*(x_2, y_2) \exp \left[i \frac{\omega}{c} \left(\frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{h_1} + \frac{x_2 u + y_2 v}{h_2} \right) \right] dx_2 dy_2 dx_1 dy_1 \quad (2.10)$$

Комплексная амплитуда восстановленной волны в выходной плоскости $x_3 y_3$ будет

$$e(x_3, y_3) = -\frac{i}{\lambda h_3} \exp \left[i \frac{\omega}{c} \left(h_3 + \frac{x_3^2 + y_3^2}{2h_3} \right) \right] \int \int_{u v} e(u, v) \exp \left[i \frac{\omega}{c} \left(-\frac{ux_3 + vy_3}{h_3} + \frac{u^2 + v^2}{2h_3} \right) \right] dudv \quad (2.11)$$

Подставляя выражение (2.10) в (2.11) и принимая, что расстояния h_2 и h_3 равны, получаем

$$e(x_3, y_3) = \frac{1}{\lambda^2 h_2^2} \exp \left[i \frac{\omega}{c} \left(\frac{x_3^2 + y_3^2}{2h_3} \right) \right] \int \int_{x_2 y_2} e^*(x_2, y_2) \exp \left[i \frac{\omega}{c} \left(-\frac{x_2^2 + y_2^2}{2h_2} \right) \right] \cdot \delta \left[\frac{\omega}{c} \left(\frac{x_2 - x_3}{h_2} \right), \frac{\omega}{c} \left(\frac{y_2 - y_3}{h_2} \right) \right] dx_2 dy_2 \quad (2.12)$$

где

$$e^*(x_2, y_2) = \frac{i}{\lambda h_1} \exp \left[i \frac{\omega}{c} \left(-h_1 + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2h_2} \right) \right] \int \int_{x_1 y_1} e^*(x_1, y_1) \cdot t^*(x_2, y_2) \cdot \exp \left[i \frac{\omega}{c} \left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{2h_1} + \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{h_1} \right) \right] dx_1 dy_1 \quad (2.13)$$

$$\delta \left[\frac{\omega}{c} \left(\frac{x_2 - x_3}{h_2} \right), \frac{\omega}{c} \left(\frac{y_2 - y_3}{h_2} \right) \right] = \int \int_{u v} \exp \left[i \frac{\omega}{c} \left(\left(\frac{x_2 - x_3}{h_2} \right) u + \left(\frac{y_2 - y_3}{h_2} \right) v \right) \right] dudv \quad (2.14)$$

Окончательное выражение комплексной амплитуды восстановленной волны в выходной плоскости будет

$$e(x_3, y_3) = \frac{i}{\lambda^3 h_1 h_2^2} \exp \left[i \frac{\omega}{c} \left(-h_1 + \frac{x_3^2 + y_3^2}{2h_3} \right) \right] \cdot t^*(x_3, y_3) \int \int_{x_1 y_1} e^*(x_1, y_1) \cdot \exp \left[i \frac{\omega}{c} \left(\frac{x_1 x_2 - y_1 y_2}{h_1} - \frac{x_1^2 + y_1^2}{2h_1} \right) \right] dx_1 dy_1 \quad (2.15)$$

Из выражения следует, что восстановленная волна совпадает с изображением транспаранта с учётом действия диффузора и диафрагмы **D1** [9]. Каждая точка диффузора создает квазифурье 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, т.е. можно считать, что каждая Фурье-компонента транспаранта формирует в плоскости **uv** свое изображение пятна на диффузоре.

Алгоритм управления автоматизированного способа восстановления записанной голограммы с предварительной засветкой и без предварительной засветки регистрирующего слоя рассмотрена далее.

2.3. Экспериментальное исследование зависимости дифракционной эффективности голограмм от плотности энергии экспонирования

Экспериментальным путем определяется зависимости дифракционной эффективности голограмм от плотности энергии экспонирования в методе записи спекл-волновой Фурье-голограмм и в схеме автоматизированной записи Фурье-голограмм спекл-волной, используя в качестве регистрирующей среды фотополимеризующиеся носитель (ФПН) Omni Dex® 352.

Для снятия этих зависимостей была использована автоматизированная оптическая структурная схема, показанная на рис. 2.2.

Дифракционная эффективность определяется по известной формуле $\eta = (I_d/I_o) \cdot 100\%$, где I_d – интенсивность дифрагированной волны, I_o – интенсивность опорной волны. Энергия экспонирования определяется по формуле $E = (I_o + I_n) \cdot t_e$, где I_n – интенсивность предметной волны, t_e – время экспонирования.

Экспериментальным путем, с помощью измерителя мощности лазерного излучения ИМО-2 были определены следующие параметры записанной

голограммы: измеренная величина I_0 – устанавливалась в обоих случаях одинаковая (спекл-волнового метода записи и автоматизированного способа записи), измеренная величина I_d – получились в обоих случаях разными, измеренная величина I_n – получились в обоих случаях одинаковыми, время экспонирования t_e , в диапазоне от 1 до 5 секунд шагом 1 секунд. Экспериментально полученные результаты, вычисленные по результатам эксперимента, E и η заносим в таблицу 2.1 и построим графики зависимостей.

Зависимости дифракционной эффективности голограмм от плотности энергии экспонирования в методе записи спекл-волнового Фурье-голограмм (кривая 1) и в схеме автоматизированной записи Фурье-голограмм спекл-волной (кривая 2) для ФПН Omni Dex® 352 показано на рис. 2.3.

Таблица 2.1.

№ п/п	параметры	Единица измерения	1-я измерения	2-я измерения	3-я измерения	4-я измерения	5-я измерения
Данные, полученные экспериментальным путем							
1.	I_0 - интенсивность опорной волны	мВт/см ²	7	7	7	7	7
2.	I_d в схеме записи спекл-волновой Фурье голограмм	мВт/см ²	0.28	0.63	1.19	1.68	1.75
3.	I_d в автоматизирован. схеме записи	мВт/см ²	0.21	0.56	1.26	1.75	1.82
4.	I_n в схеме записи спекл-волновой Фурье голограмм	мВт/см ²	3	3	3	3	3
5.	I_n в автоматизирован. схеме записи	мВт/см ²	3	3	3	3	3
6.	t_e – время экспонирования	секунда	1	2	3	4	5
Данные полученные расчётным путем							
7.	η , в схеме записи		4	9	17	24	25

	спекл-волновой Фурье голограмм						
8.	η , в автоматизированной схеме записи		3	8	18	25	26
9.	Е, в схеме записи спекл-волновой Фурье голограмм	мДж/см ²	10	20	30	40	50
10.	Е, автоматизирован. схеме записи	мДж/см ²	10	20	30	40	50

Из графиков (1) и (2) видно, что эти кривые почти совпадают, т.е. можно утверждать, что предложенному методу записи присущи все преимущество существующих методов записи Фурье - голограмм. По этим характеристикам определяется оптимальная плотность энергии экспонирования. В данном случае, для данного материала выбрана оптимальная плотность энергии экспонирования в пределах от 30 до 40 мДж/см². Мы видим, что дифракционная эффективность увеличивается на 1 %, при использовании предложенного метода. Время экспонирования лежит в пределах 3-4 секунды.

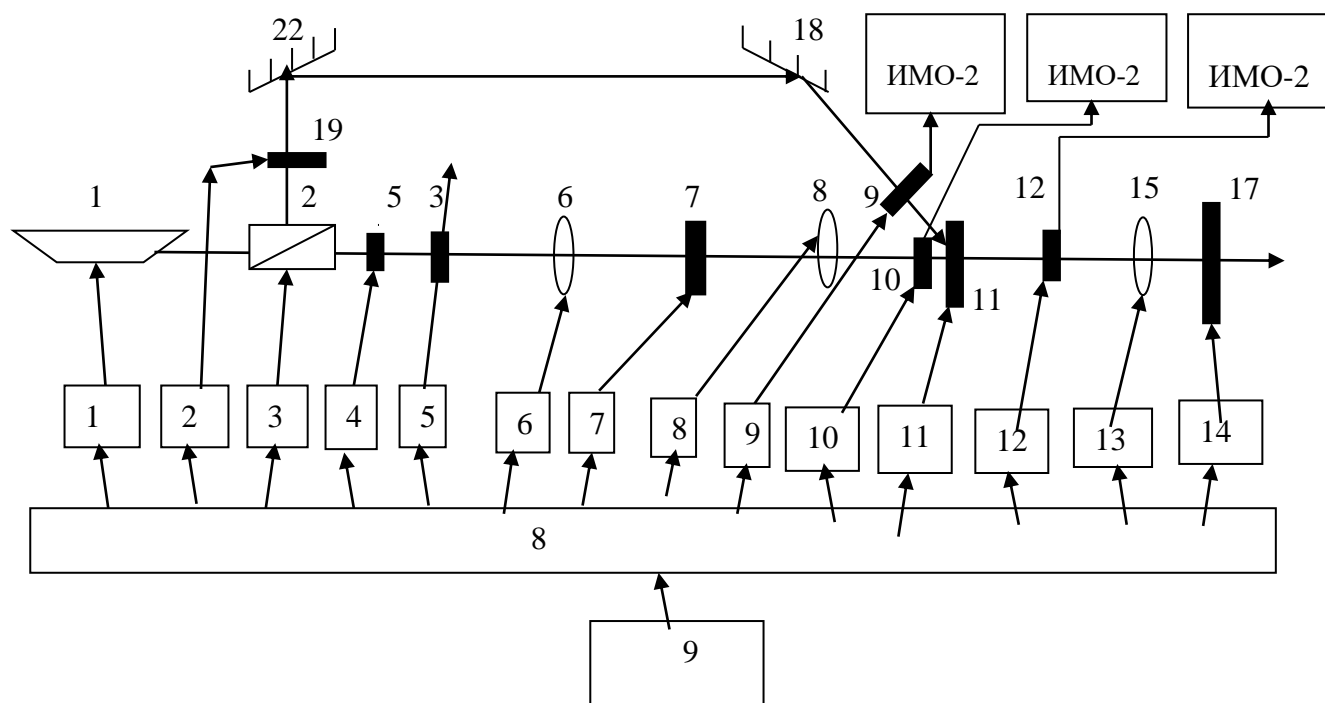


Рис. 2.2. Оптическая структурная схема для получения зависимости дифракционной эффективности от энергии экспонирования.

1-лазер; 2- светоделитель; 3 – диффузор; 5 и 19 – электромагнитные прерыватели; 6, 8 и 15 – линзы; 7 – транспарант; 9, 10, 12 -ИМО; 11 – регистрирующая среда; 17 – экран; 18 и 22 – зеркала.

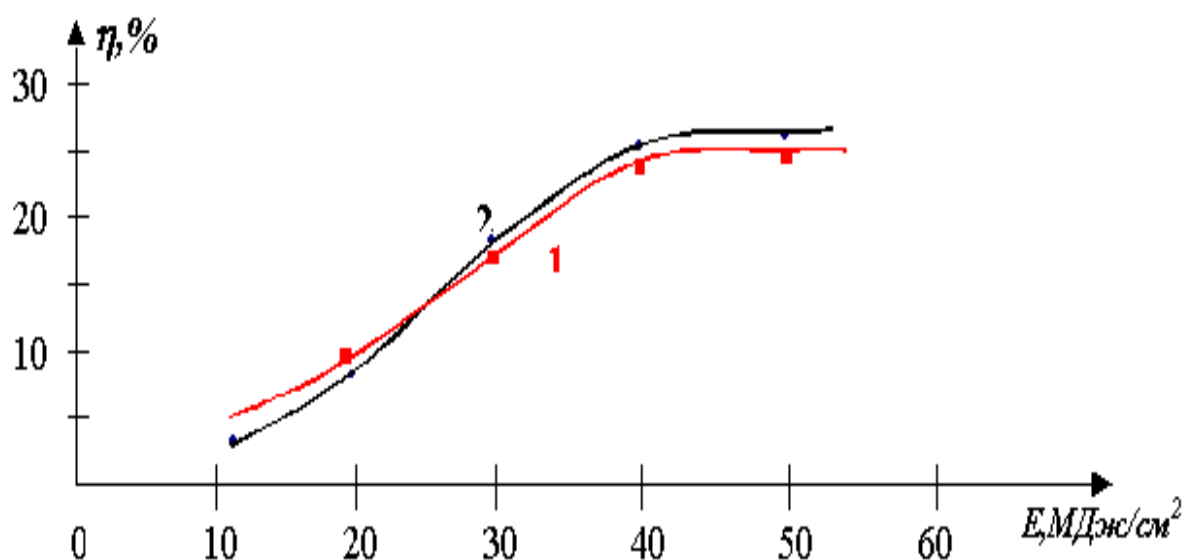


Рис.2.3. График позволяющий определить оптимальную энергии экспонирования в схеме записи Фурье голограмм спекл-волной (кривая 1) и в схеме автоматизированной записи фурье-голограмм спекл-волной (кривая 2) для ФПН Omni Dex® 352

Экспериментальным путем определена оптимальная плотность энергии экспонирования для фотополимеризующихся носителей схема записи Фурье-голограмм спекл-полем, оно составляет от 30 до 40 мДж/см². В результате экспериментальных исследований обнаружили, что при предварительной засветке регистрирующего слоя опорным пучком, происходит существенное увеличение дифракционной эффективности записанных голограмм [14].

Алгоритм управления автоматизированного способа измерения интенсивности предметной и дифрагированной волны записанной голограммы спекл-волновом методе записи голограмм и автоматизированном способе записи голограмм рассмотрена далее.

2.4. Экспериментальное исследование зависимости отношения интенсивностей сигнал/шум от соотношения интенсивностей опорной и предметной волн

Проведены исследования по измерению отношения сигнал/шум $I_o/I_{ш}$ при разных соотношениях интенсивностей опорной и предметной волн. Под интенсивностями сигнальной и шумовой волн понималось интенсивность информационной единицы и информационного нуля в выходной плоскости восстановленного изображения [29].

Экспериментальным путем определяем зависимости отношения интенсивностей сигнал/шум от соотношения интенсивностей опорной и предметной волн в схеме записи Фурье-голограмм спекл-волнового метода и в автоматизированном способе записи с использованием диффузора, используя в качестве регистрирующей среды фотополимеризующиеся носитель.

Для снятия этих зависимостей используем структурную оптическую схему, показанную на рисунке 2.2. На рисунке 2.4. показана маска.

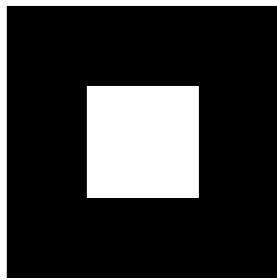
Экспериментальным путем с помощью измерителя мощности лазерного излучения ИМО-2 определили следующие параметры записанной голограммы: измеренные величины I_o – интенсивность опорной волны, устанавливали в обоих случаях одинаковыми, измеренная величина $I_{п}$ – интенсивность предметной волны устанавливали в обоих случаях одинаковыми, измеренная величина $I_{сд}$ – интенсивность сигнальной волны в автоматизированной схеме записи с применением диффузора, $I_{шд}$ – интенсивность шумовой волны в автоматизированной схеме записи с применением диффузора, $I_{сф}$ – интенсивность сигнальной волны в схеме спекл-волнового метода записи Фурье-голограмм, $I_{шф}$ – интенсивность шумовой волны в схеме записи спекл-волнового метода Фурье-голограмм, время экспонирования t_e – 4 секунды. По экспериментальным данным рассчитаем отношение $I_o/I_{п}$, $I_{сд}/I_{шд}$, $I_{сф}/I_{шф}$. Экспериментально полученные результаты и по результатам эксперимента

вычисленные результаты заносим в таблицу 2.2 и построим график зависимостей. На рисунке 2.4.а) показана маска для измерения сигнала, а на рис. 2.4.б) показана маска для измерения шума.

Зависимости отношения $I_c/I_{ш}$ от соотношения интенсивностей опорной и предметной волн при записи Фурье-голограммы спекл-волновым методом (кривая 1) и с автоматизированном способе записи с использованием спекл-волн (кривая 2) для ФПН Omni Dex® 352 показано на рис. 2.5.

Таблица 2.2.

№ п/п	параметры	Единица измерения	1-я измерения	2-я измерения	3-я измерения	4-я измерения	5-я измерения
Данные полученные экспериментальным путем							
1.	I_o - интенсивность опорной волны	мВт/см ²	7	7	7	7	7
2.	I_p - интенсивность предметной волны	мВт/см ²	4.7	3.5	2.8	2.3	1.75
3.	$I_{сд}$ в схеме автоматизированной записи	мВт/см ²	1.88	1.4	1.12	0.92	0.7
4.	$I_{шд}$ в схеме автоматизированной записи	мВт/см ²	0.11	0.035	0.019	0.013	0.011
5.	$I_{сф}$ в схеме записи с спекл-волной	мВт/см ²	1.88	1.4	1.12	0.92	0.7
6.	$I_{шф}$ в схеме записи с спекл-волной	мВт/см ²	0.094	0.046	0.031	0.022	0.017
7.	$t_э$ - время энергии экспонирования	секунда	4	4	4	4	4
Данные полученные расчетным путем							
8.	I_o/I_p		1.5	2	2.5	3	4
9.	$I_{сд}/I_{шд}$		18	40	60	70	65
10.	$I_{сф}/I_{шф}$		20	30	36	42	41



а)



б)

Рис.2.4. а- маска для измерения сигнала, б- маска для измерения шума.

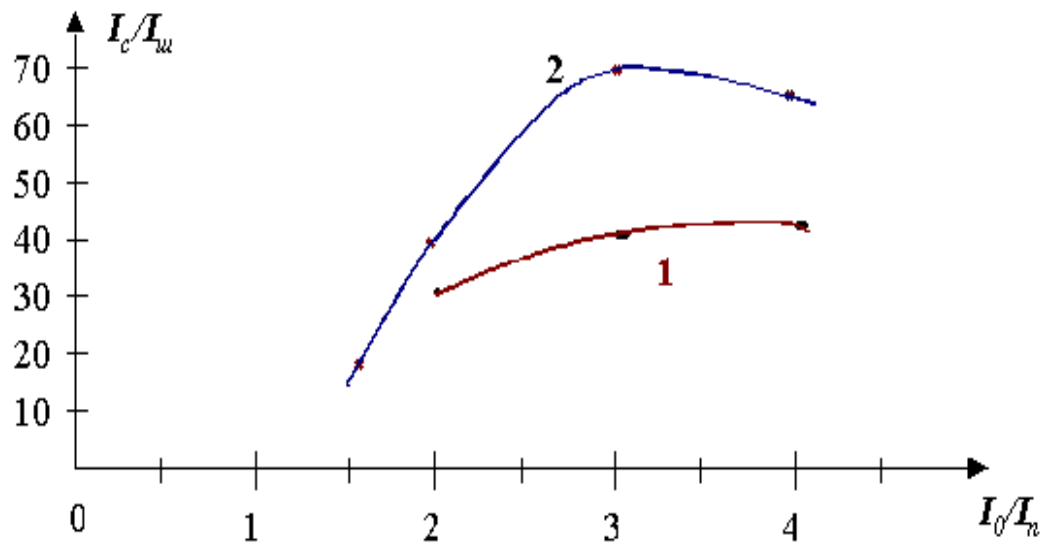


Рис.2.5.

Экспериментальным путем полученные зависимости отношения I_c/I_m от соотношения интенсивностей опорной и предметной волн при записи Фурье-голограмм спекл-волновым методом (кривая 1) и с автоматизированном способе записи (кривая 2) для ФПН Omni Dex® 352.

Сравнивая кривые (1) и (2) видим, что при переходе в линейной области, отношения $I_c/I_{ш}$ заметно увеличивается при использовании автоматизированного способа записи по сравнению с спекл-волновым методом, т.е. в интервале изменение отношение интенсивностей опорной/предметной волн от 2 до 3 при использовании автоматизированного способа записи отношение сигнал/шум увеличивается на 14, что приводит к получению изображения хорошего качества [14].

Экспериментальным путем определено оптимальное отношение опорной и предметной волн, оно лежит в диапазоне от 2,5 до 3, и позволяет достигать максимальное значения отношение сигнал/шум (от 60 до 70).

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

В главе рассмотрен автоматизированный способ записи и восстановления голограмм, позволяющий сузить диапазона изменения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы. Для формирования спекл-волны используется система диффузор линза. При этом получаем достаточно однородное распределение интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы.

1. При определении комплексной амплитуды информационной световой спекл-волны использован приближение Френеля. Из полученной выражении описывающее распределение комплексных амплитуд информационной световой спекл-волны в плоскости регистрации голограмм следует, что комплексная амплитуда спекл-волны в пространственно-частотной плоскости голограммы 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 автоматизированного восстановления площадь голограммы используется эффективно, что приводит к получению максимально возможной дифракционной эффективности голограмм.

2. По полученным выражением комплексной амплитуды восстановленной волны в выходной плоскости для случая когда опорные и восстанавливающие волны плоские и комплексно-сопряженные между собой следует, что восстановленная волна совпадает с изображением транспаранта с учетом действия, диффузора и диафрагмы. При этом каждая точка диффузора создает квазифурье спектр транспаранта со своим фазовым множителем в плоскости голограммы. Следовательно, даже при узком Фурье-спектре транспаранта пятно на голограмме в пространственно- частотной плоскости должна напоминать оптическое пятно на диффузоре.

3. Экспериментальные исследования показали, что автоматизированный способ записи Фурье-голограмм обладает определенными преимуществами, присущими схемам записи со спекл-полем. При этом 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 помехозащищенности записанных голограмм. Высокая однородность распределения светового поля в плоскости регистрации голограмм приводит к получению максимально возможной дифракционной эффективности с удовлетворяющим качеством восстановленного изображения который определяется отношением сигнал/шум.

4. Оптическая схема автоматизированного способа более простая технологически по сравнению со схемой записи спекл-полем.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СПОСОБА ЗАПИСИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПОРНЫХ СПЕКЛ-ВОЛН С РАЗЛИЧНЫМ ФАЗОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В ПЛОСКОСТИ РЕГИСТРАЦИИ

3.1. Запись и восстановление мультиплексных голограмм

Мультиплексной называют такую голограмму, на которой одновременно записано много изображений, либо отдельно записаны части одного изображения, либо единственное изображение зарегистрировано много раз [39,40,54]. Рассмотрим следующее:

1. Способ разделения голограммы на отдельные части, т.е. пространственное мультиплексирование.
2. Составная голограмма.
3. Голограммы, записанные с помощью сканирующего источника света.
4. Запись мультиплексированных изображений.

При решении задачи хранения данных для записи большого числа голограмм, применяя способ пространственного мультиплексирования, можно использовать единственную фотопластинку или какой-либо иной материал, причем каждая голограмма может независимо восстанавливать изображения записанных на ней данных. При этом голограммы могут образовывать решетку типа шахматного поля, а для считывания изображения с каждой голограммы лазерный луч сканирует по решетке.

Под составными голограммами мы имеем в виду голограммы, которые формируют изображения, состоящие из отдельных частей, каждая из которых была записана самостоятельно.

Голограммы, записанные с помощью сканирующего источника, — это такие голограммы, при регистрации которых использован либо сканирующий

пучок света для освещения объекта, либо сканирующий опорный пучок для освещения голограммы.

Рассмотрим теперь вопрос регистрации большого количества изображений на одну голограмму. Отличие от предыдущих случаев состоит в том, что не все эти изображения восстанавливаются в одно и то же время. Например, мы хотим зарегистрировать на одной голограмме большое число страниц с записанными на них данными или один и тот же объект в нескольких ракурсах. В этом случае от экспозиции к экспозиции меняется угол падения опорного пучка, так что для каждого изображения регистрируется своя картина интерференционных полос. Если освещающая голограмму волна приходит с того же самого направления, что и опорная волна при записи, то восстанавливается соответствующая объектная волна, которая и формирует требуемое изображение. Ограничения, накладываемые на число и поле зрения записываемых изображений, зависят от толщины регистрирующей среды и вида модуляции. При использовании фазовых голограмм можно записать больше изображений, чем при других видах модуляции.

Если освещающая голограмму волна падает на регистрирующую среду под углом Брэгга (когда волны, отраженные от каждого отражающего слоя, складываются в фазе), то яркость восстановленного изображения оказывается максимальной. С увеличением толщины голограммы уменьшается допустимое отклонение освещающего пучка от угла Брэгга [20,35,41,59].

Ограниченный диапазон углов освещения, при которых может быть получено изображение, означает, что использование разных углов между объектным и опорным пучками позволяет записать на одной голограмме много изображений, причем эти изображения можно считывать одновременно. Если условие Брэгга выполняется для одного изображения, то оно не удовлетворяется для других.

Максимальная дифракционная эффективность голограммы, которая модулирует считывающую волну за счет поглощения, оказывается низкой, даже если записывается только одна голограмма.

Если объектная волна является плоской, то дифракционная эффективность толстой фазовой голограммы может достигать теоретически 100%. В действительности волна не бывает плоской, а изменяется по амплитуде по площади голограммы. Это означает, что нельзя получить оптимальное значение отношения энергии опорной волны к объектной по всей голограмме. Кроме того, если записывается много изображений, дифракционная эффективность падает еще сильнее.

Трехмерные голограммы были впервые предложены Денисюком в 1962 г. [26]. Чтобы выявить главные особенности трехмерных голограмм, рассмотрим простейший случай записи, когда волна, несущая информацию, так же, как и опорная волна, является плоской [31,38,73].

На рис.3.1. изображен слой светочувствительной среды толщиной D , расположенный параллельно плоскости xy . Предполагается, ради простоты, что слой окружен иммерсионной средой, и поэтому на границах слоя преломление отсутствует. Волна, несущая сигнал, падает на переднюю границу фоточувствительной среды под углом ψ в плоскости xz , т.е.

$$E_c(x,y,z)=F_0 \exp[-i\varphi(x,z)], \quad \varphi(x,z)=k(x \sin \psi + z \cos \psi), \quad (3.1)$$

а опорная волна – под углом θ , т.е.

$$E_{on}(x,y,z)=\exp[-i\alpha(x,z)], \quad \alpha(x,z)=k(x \sin \theta + z \cos \theta). \quad (3.2)$$

Суммарное поле, являющееся результатом интерференции этих волн, образует стоячую волну. Поэтому внутри голограммы возникает слоистая структура (например, изменения плотности), причем максимумы располагаются в плоскостях, где волны складываются в фазе [53,77]. Поскольку распределение усредненной интенсивности результирующего поля равно

$$\bar{I} = \frac{1}{2}(F_0^2 + A_0^2) + F_0 A_0 \cos(\varphi - \alpha) = \frac{1}{2}(F_0^2 + A_0^2) + F_0 A_0 \cdot \cos[k(x \sin \psi + z \cos \psi) - k(x \sin \theta + z \cos \theta)] \quad (3.3)$$

полосы (например, слои максимального показателя преломления) направлены по биссектрисе угла между опорным и сигнальным лучами, т. е. имеют угол наклона

$$\Phi = (\psi + \theta)/2. \quad (3.4)$$

Действительно, из (3.3) следует, что полосы определяются уравнением

$$\cos[kx(\sin \psi - \sin \theta) + kz(\cos \psi - \cos \theta)] = 1, \quad (3.5)$$

откуда следует, что

$$kx \cdot 2 \sin \frac{\psi - \theta}{2} \cos \frac{\psi + \theta}{2} - kz \cdot 2 \sin \frac{\psi - \theta}{2} \sin \frac{\psi + \theta}{2} = 2\pi n, \quad (3.6)$$

где $n=0,1,2,\dots$, или

$$2k \sin \frac{\psi - \theta}{2} \left(\cos \frac{\psi + \theta}{2} - z \sin \frac{\psi + \theta}{2} \right) = 2\pi n, \quad (3.7)$$

Как видно, полосы являются прямыми, определяемыми уравнением

$$x \cos \frac{\psi + \theta}{2} = 2\pi n \left(k \sin \frac{\psi - \theta}{2} \right)^{-1} + z \sin \frac{\psi + \theta}{2}. \quad (3.8)$$

Отсюда видно, что тангенс угла наклона каждой полосы равен

$$\frac{x}{z} = \operatorname{tg} \frac{\psi + \theta}{2} = \operatorname{tg} \Phi, \quad (3.9)$$

что и доказывает (3.4).

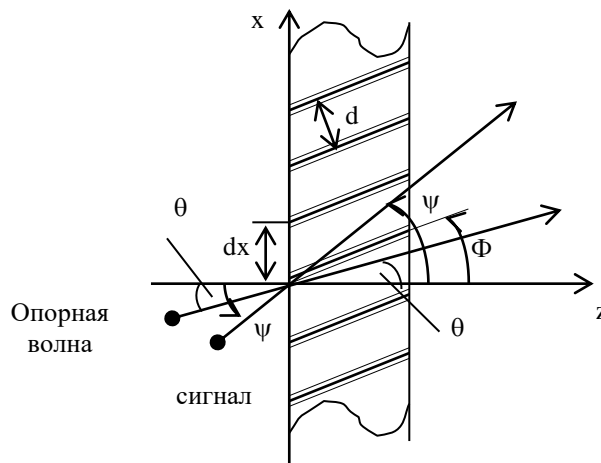


рис.3.1. Запись информации в трехмерной среде.

Если первая полоса проходит через начало координат, то соседняя сдвинута по оси x на величину

$$d_x = \pi \left(k \sin \frac{\psi - \theta}{2} \cos \frac{\psi + \theta}{2} \right)^{-1} = \lambda (\sin \psi - \sin \theta)^{-1}. \quad (3.10)$$

Следовательно, расстояние между полосами, или шаг решетки будет равно

$$d = d_x \cos \frac{\psi + \theta}{2} = \lambda \left(2 \sin \frac{\psi - \theta}{2} \right)^{-1}, \quad (3.11)$$

где d_x – расстояние между соседними полосами вдоль оси (рис.3.1).

Посмотрим теперь, как воспроизвести информацию, записанную в трехмерной голограмме, т. е. какой должен быть угол падения восстанавливающей волны, чтобы интенсивность считываемой информации была максимальной.

Будем считать, что плоская волна падает на проявленную трехмерную голограмму под углом θ' , который отличается от угла θ опорной волны при записи голограммы [23,46,64]. Поскольку полосы максимального отклика среды играют роль частично отражающих плоских зеркал, падающая на голограмму волна будет отражаться от этих слоев в соответствии с обычными законами отражения (рис.3.2). Для того чтобы волны, отраженные от различных полос, складывались в фазе, разность хода между ними должна равняться целому числу длин волн.

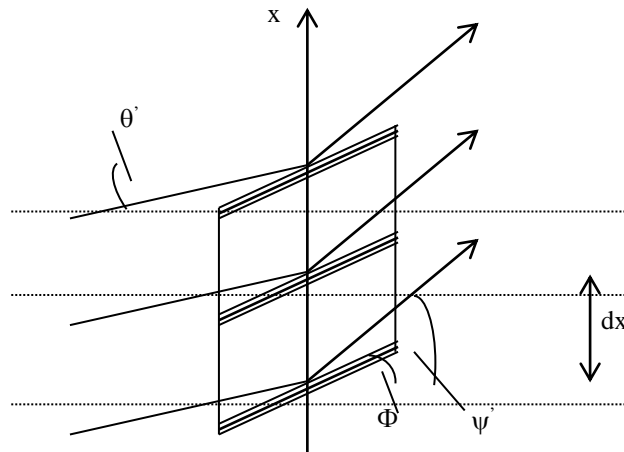


рис. 3.2. Считывание информации с трехмерных голограмм.

Если ограничиться рассмотрением первого максимума, то оптические пути волн, отраженных от соседних полос, должны отличаться на одну длину волны. Обозначая длину восстанавливающей волны через λ' , которая отличается от длины волны при записи, получим в соответствии с рис.3.2

$$(2\pi/\lambda')d_x(\sin\psi' - \sin\theta') = 2\pi \quad (3.12)$$

отсюда следует

$$\sin\psi' = \sin\theta' + \lambda'/d_x \quad (3.13)$$

или, с учетом (3.10),

$$\sin\psi' = \sin\theta' + (\lambda'/\lambda)(\sin\psi - \sin\theta). \quad (3.14)$$

Как видно, при $\lambda' = \lambda$ восстановленная волна имеет максимальную интенсивность в том случае, когда при считывании применяется та же опорная волна, что и при записи. Эта волна образует мнимое изображение и является единственной [57,58,74]. Таким образом, в идеальном случае вся энергия плоской считывающей волны перекачивается в энергию волны, создающей мнимое изображение.

Если голограмму осветить волной, комплексно-сопряженной с опорной волной, т.е. направить волну с противоположной стороны голограммы под углом $\pi - \theta$, то получится действительное изображение объекта, т. е. восстановится волна объекта, которая идет в направлении, противоположном тому, которое она имела при записи. Таким образом, в случае трехмерной голограммы восстанавливается либо мнимое, либо действительное изображение. Это позволяет, например, снять на одну голограмму два объекта, расположенных симметрично по отношению к опорному лучу и наблюдать их отдельно [56].

Изложенные выше особенности наиболее легко проследить в простейшем случае трехмерной голограммы, в которой полосы расположены перпендикулярно плоским границам. Такие полосы интерференции

образуется при $\sin\psi = -\sin\theta$, т.е. когда опорная и сигнальная волны падают на голограмму симметрично относительно нормали к поверхности голограммы. В этом случае направление сигнальной волны при записи определяется углом $\psi = 2\pi - \theta = -\theta$, а расстояние между интерференционными полосами в соответствии с (3.11) равно

$$d = d_x = \lambda / (2 \sin \theta). \quad (3.15)$$

При восстановлении информации волны, отраженные от слоев, будут складываться в фазе, если считывающая плоская волна падает на голограмму под углом, удовлетворяющим условию Брэгга:

$$\sin \theta' = \lambda / 2d = \sin \theta, \quad (3.16)$$

т.е. считывание должно производиться такой же волной, какая использовалась в качестве опорной при записи голограммы [24]. Из (3.14) видно, что интенсивность восстановленной волны максимальна в направлении, определяемом углом ψ .

Надо отметить, что расстояние между полосами, образующимися внутри голограммы, т.е. шаг трехмерной дифракционной решетки, уменьшается с увеличением угла между опорной и сигнальной волнами и стремится к половине длины волны при скользящем встречном падении этих волн.

Можно по-разному закодировать опорные волны, соответствующие каждой объектной волне. Иными словами, можно сделать так, что каждая из них будет иметь разные фазы. Это осуществляется, например, пропусканием опорной волны через различные участки матового стекла.

3.2. Разработка автоматизированного способа записи мультиплексированных спекл-голограмм с использованием спекловых опорных волн

Разработка автоматизированного способа записи мультиплексированных голограмм на фотополимеризующиеся носители (ФПН) вызывает несомненный

интерес. Существует последовательные и параллельные методы регистрации мультиплексированных голограмм на ФПН. При последовательном методе регистрации на ФПН мультиплексирование голограмм заключается в проведении нескольких экспозиций на регистрирующий слой и затем проявления путем нагрева регистрирующего слоя в течение одного часа при температуре 100° С. Однако, для локальной записи мультиплексированных голограмм на предварительно обработанный ультрафиолетовым излучением фотополимеризующийся носитель при ИК – нагреве более эффективно применение параллельного метода регистрации за счет устранения влияния неоднородности распределения интенсивности излучения по сечению ИК – пучка на качество проявления голограммы по ее площади. Параллельный метод также обеспечивает расширение передаточной характеристики и низкий уровень шума и позволяет получать дифракционную эффективность (ДЭ) для фурье – голограмм $\eta = 12 - 14\%$.

Пространственно-модулированные опорные волны получили широкое распространение в практике голографической регистрации световых полей. Принято считать, что при использовании пространственно-модулированной (диффузно-рассеянной) опорной волны для восстановления неискаженного предметного поля достаточно, чтобы восстанавливающая волна была идентична опорной [47,49].

С уменьшением же толщины регистрирующей среды угловая селективность голограмм падает [19], для улучшения информационных характеристик записанной голограммы возникает целесообразность введения другого критерия - условия разделения изображений с наложенных соседних голограмм.

В связи с этим в настоящей работе рассматривается автоматизированный способ записи мультиплексированных голограмм с математическим описанием и условием пространственного разделения изображений.

Целью настоящей работы являются теоретическое и экспериментальное исследования автоматизированного способа селективности схемы (рис.3.3) 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.

Схема автоматизированной записи мультиплексированных голограмм спекл-волной приведена на рис.3.3. 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 окошкой q. На рис. 3.4, а показано размещение транспаранта и маски с окошкой. 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 области q r_1 представляет собой функцию, 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 .

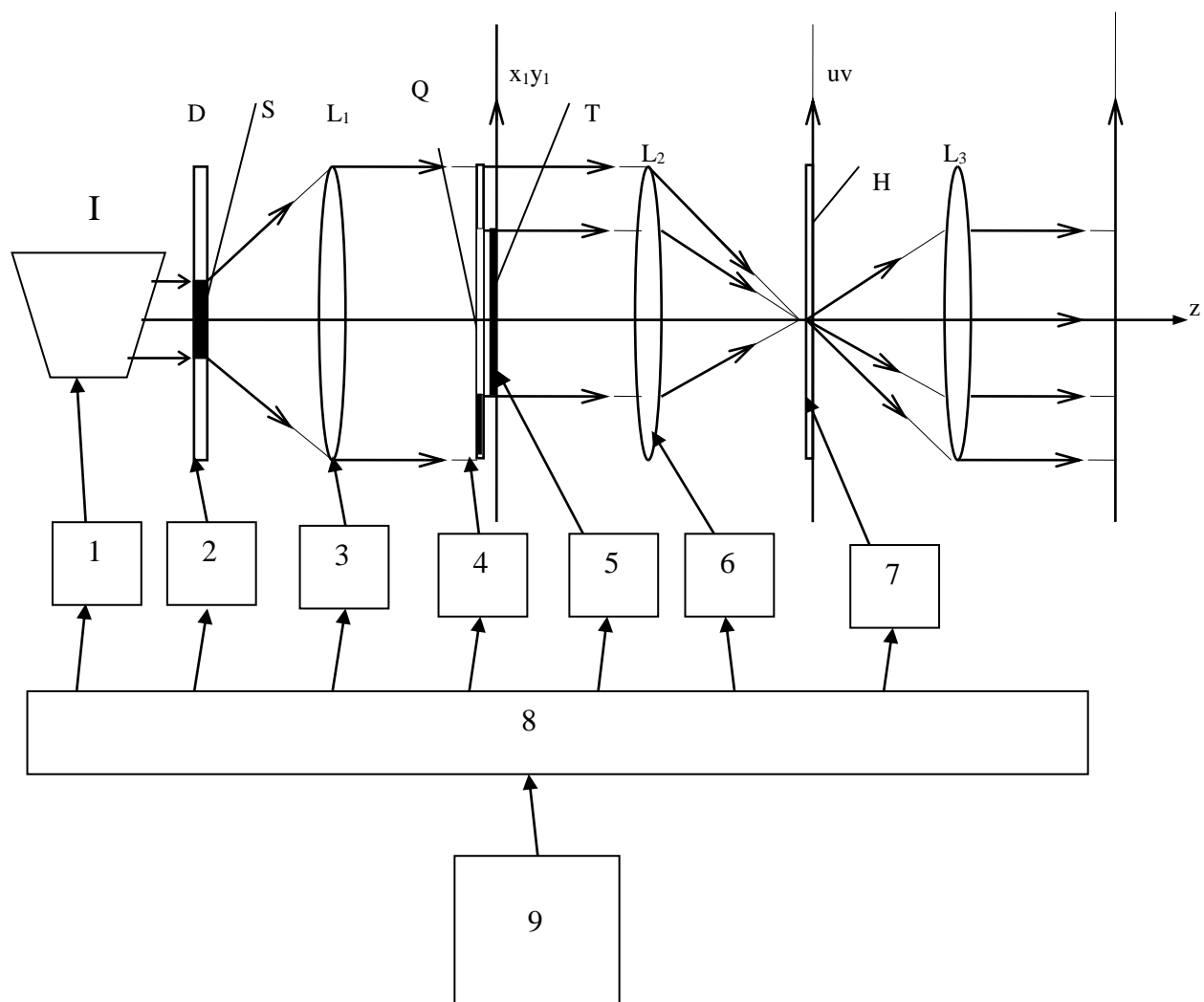


Рис.3.3. Автоматизированный способ записи и восстановления мультиплексированных голограмм спекл- волной. I – лазерное излучение; D – диффузор; S – освещаемая площадь; L_1 , L_2 , L_3 – линзы; Q – маска с окошком; T – транспарант; H – регистрирующая среда. 1-7 электронные блоки позволяющие устанавливать оптические элементы в нужное положение. 8- устройство управления, 9- компьютер

При записи второй голограммы маска с окошкой поворачивается в плоскости x_1y_1 вокруг оси z на угол φ (рис.3.4, б), 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 .

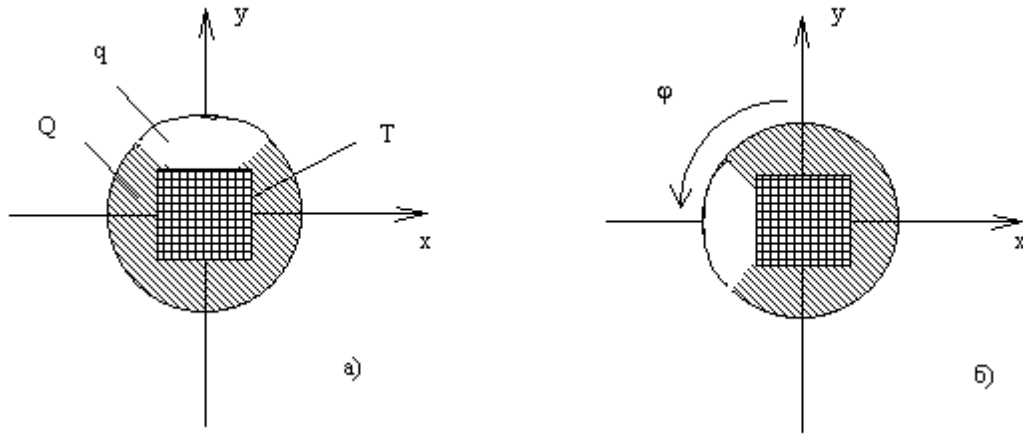


Рис.3.4. Размещение транспаранта Т и маски Q с окошком q.
а) при записи первой голограммы, $\varphi=0$.
б) при записи второй голограммы, $\varphi=90^\circ$.

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

$$a_I(x_I, y_I) + r_I(x_I, y_I - b). \quad (3.17)$$

В плоскость регистрирующей среды uv комплексная амплитуда волны равна

$$A_I(u, v) + R_I(u, v) \exp(i2\pi vb), \quad (3.18)$$

где $A_I(u, v)$ и $R_I(u, v)$ - соответственно фурье-образы $a_I(x_I, y_I)$ и $r_I(x_I, y_I)$.

Для интенсивности имеем

$$\begin{aligned} I(u, v) = & A_I(u, v) A_I^*(u, v) + R_I(u, v) R_I^*(u, v) + A_I(u, v) R_I^*(u, v) \exp(-i2\pi vb) + \\ & + A_I^*(u, v) R_I(u, v) \exp(i2\pi vb) \end{aligned} \quad (3.19)$$

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 (3.19). Если осветить голограмму волной с комплексной амплитудой $R_I(u, v) \exp(i2\pi vb)$, то комплексная амплитуда волны, соответствующий этому члену, в плоскости uv пропорциональна

$$E_I(u, v) = R_I(u, v) R_1^*(u, v) A_I(u, v) \quad (3.20)$$

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

$$e_I(x_2, y_2) = \iint_{uv} R_1(u, v) R_1^*(u, v) A_I(u, v) \exp[-i2\pi(ux_2 + vy_2)] du dv. \quad (3.21)$$

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

$$R_I(u, v) R_1^*(u, v) = \iint_{x_2y_2} \beta_1(x_2, y_2) \exp[i2\pi(ux_2 + vy_2)] dx_2 dy_2, \quad (3.22)$$

$$\text{где } \beta_1(x_2, y_2) = \iint_{xy} r_1^*(x, y) r_1(x + x_2, y + y_2) dx dy. \quad (3.23)$$

Тогда $e_I(x_2, y_2)$ принимает вид

$$e_I(x_2, y_2) = \iint_{uv} \left\{ \iint_{x_2y_2} \beta_1(x_2, y_2) \exp[i2\pi(x_2u + y_2v)] dx_2 dy_2 \iint_{x_2y_2} a_1(x_2, y_2) \exp[i2\pi(x_2u + y_2v)] dx_2 dy_2 \right\} \cdot \exp[-i2\pi(x_2u + y_2v)] du dv \quad (3.24)$$

Используя теорему о свертке, имеем

$$e_I(x_2, y_2) = \iint_{xy} \beta_1(x, y) a_1(x_2 - x, y_2 - y) dx dy \quad (3.25)$$

Отсюда видно, что комплексная амплитуда волны в выходной плоскости представляет собой свертку $a_I(x_2, y_2)$ с функцией автокорреляции пропускания $r_I(x_2, y_2)$. Такая свертка дает неискаженное изображение выходного транспаранта $a_I(x_2, y_2)$, если автокорреляционная функция $\beta_1(x_2, y_2)$ представляет собой δ -функцию [42],.

3.3. Разработка автоматизированного способа восстановления мультиплексированных спекл – голограмм с учетом действия диффузора

Для автоматизированного способа восстановления данных с каждой мультиплексированной голограммы необходимо существование признака, по которому бы различалась каждая пара «опорный пучок – записанная голограмма». При этом наличие или отсутствие данного признака у опорного пучка должна быть определяющим фактором в отношении способности этого

пучка восстанавливать данную голограмму. Это значит, что наличие такого признака у опорной волны обеспечивает взаимодействие именно с той голограммой, при записи которой принимал участие опорный пучок с волной, обладающей тем же самым признаком. Еще один, немаловажный фактор состоит в том, чтобы восстанавливающий опорный пучок не взаимодействовал с другими голограммами, при регистрации которых не принимал участие этот опорный пучок. Это требование определяет наличие и отсутствие перекрестных помех при восстановлении голограмм [4,6,7].

Автоматизированный способ восстановления Фурье-голограмм спекл-полем работает следующим образом: на стандартном голографическом столе собирается схема, реализующая автоматизированный способ восстановления Фурье-голограмм спекл-полем. В [42] описан автоматизированный способ записи и восстановления Фурье-голограмм спекл-полем, когда опорный пучок не является пространственно модулированным. Алгоритм, описывающий работу автоматизированного способа восстановления голограмм, когда опорный пучок является пространственно модулированным приведен на рис.3.3. Принцип работы и схема цифрового блока для данного устройства приведена далее [10,11,13].

Поскольку маска с окошком освещается излучением, прошедшим сквозь матовую пластинку, в результате чего освещенность в плоскости маски с окошком имеет хорошо известную случайную пятнистую структуру, то есть можно считать, что свет, прошедший через рассеиватель, излучается ансамблем вторичных точечных источников, испускающих сферические волны одинаковой амплитуды, но случайной фазы. Маска с окошком показана на рис.3.4.

Каждый из этих источников можно представить в виде произведения δ -функции на фазовый множитель: $\delta(x-x_m, y-y_m)\exp(i\varphi(x_m, y_m))$. Фурье-образ ансамбля M таких δ -функций который прошел через q имеет вид:

$$R_1(u, v) = \sum_{m=1}^M \exp[2\pi i(x_m u + y_m v)] \exp[i\varphi(x_m, y_m)]. \quad (3.26)$$

Комплексно-сопряженное выражение будет иметь вид

$$R_1^*(u, v) = \sum_{n=1}^M \exp[-2\pi i(x_n u + y_n v)] \exp[-i\varphi(x_n, y_n)], \quad (3.27)$$

откуда

$$R_1(u, v) R_1^*(u, v) = M + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \exp[2\pi i((x_m - x_n)u + (y_m - y_n)v)] \cdot \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \varphi(x_n, y_n))] \quad (3.28)$$

При этом автокорреляционная функция пропускания $r_1(x_2, y_2)$ имеет следующий вид

$$\beta_2(x_2, y_2) = M\delta(x_2, y_2) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \delta[x_2 - (x_m - x_n), y_2 - (y_m - y_n)] \cdot \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \varphi(x_n, y_n))] \quad (3.29)$$

Лазерное излучение проходя через диффузор, рассеивается линзой L_1 и попадает маску с окошком. Маска с окошком без транспаранта приведена на рис.3.5. Данная маска используется в автоматизированном способе для восстановления мультиплексированных голограмм. Плоскости $x_1 y_1$ установлена маска с окошком, лучи, прошедшие через окошко q является опорным пучком. Опорный луч проходя через линзу освещает регистрирующую среду в плоскости uv . Восстановление изображение наблюдаем в плоскости $x_2 y_2$.

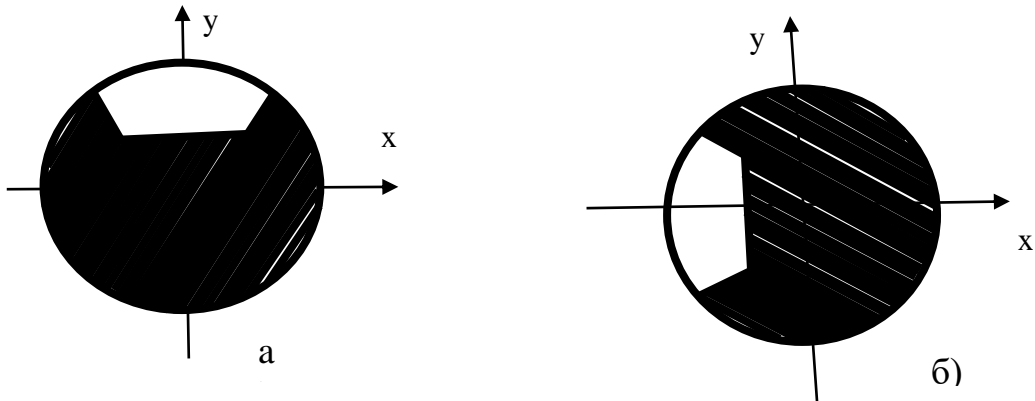


Рис.3.5. Маска с окошком
а) При восстановлении первой голограммы.
б) При восстановлении второй голограммы

Используя соотношение (3.29), в выходной плоскости имеем следующее распределение комплексных амплитуд

$$e_1(x_2, y_2) = Ma_1(x_2, y_2) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M a_1[x_2 - (x_m - x_n), y_2 - (y_m - y_n)] \cdot \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \varphi(x_n, y_n))] \quad (3.30)$$

Отсюда видно, что величина первого члена в правой части равенства (3.30), 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 постоянна, то с увеличением освещаемой площади “ S ”, т.е. с увеличением числа M , линейно возрастает комплексная амплитуда волны и площадь фона вокруг изображения в выходной плоскости [45].

3.4. Разработка автоматизированного способа исследование селективности спекл-голограмм записанных спекловой опорными волнами

Автоматизированный способ записи Фурье-голограмм с использованием пространственно-модулированных световых волн приведены в [14,18]. На основе данного способа разработаем автоматизированную оптическую схему для исследования селективности Фурье-голограмм спекл-полем.

Селективность голограммы является очень важным параметром, особенно она имеет большое значение при использовании объемных голограмм [15,20,23].

Автоматизированная оптическая схема для исследования селективности голограмм приведена на рис. 3.3.

Для исследования селективности схемы с дискретной разверткой опорного пучка вокруг предметного пучка с использованием маски с окошком

записываем четыре голограммы в одной точке, при котором каждый опорный пучок имеет свое распределение. Первую голограмму записываем со следующими координатами окошка $x_1=0$, $y_1=b$, где b - расстояние от центра координаты x_1y_1 до центра окошки при этом угол поворота маски с окошком $\varphi=0$, вторую голограмму записываем со следующими координатами окошки $x_1=-b$, $y_1=0$ в данном случае угол поворота маски с окошком $\varphi=90^0$, третью голограмму записываем со следующими координатами окошки $x_1=0$, $y_1=-b$ угол поворота маски с окошком $\varphi=180^0$, четвертую голограмму записываем со следующими координатами окошки $x_1=b$, $y_1=0$ угол поворота маски с окошком $\varphi=270^0$.

Во всех этих случаях транспарант не изменяет свои первоначальные координаты. Координаты изменяет маска с окошком что показано на рис. 3.4.

Селективность есть избирательность одной из форм при наложении голограммных объектов друг на друга. Для определения селективности голограмм в предложенном автоматизированном способе, рассмотрим восстановление первой голограммы при считывании второй голограммы [33,40]. При этом комплексная амплитуда волны первой голограммы в плоскости uv пропорциональна

$$E_{12}(u, v) = R_1(u, v)R_2^*(u, v)A_{12}(u, v)\exp[-i2\pi b(u + v)] \quad (3.31)$$

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

$$e_{12}(x_2, y_2) = \iint_{uv} R_1(u, v)R_2^*(u, v)A_{12}(u, v)\exp[-i2\pi b(u + v)]\exp[-i2\pi(ux_2 + vy_2)]dudv \quad (3.32)$$

Используя теоремы о корреляции и свертки двух функций имеем

$$e_{12}(x_2, y_2) = \iint_{xy} \beta_{12}(x_2, y_2)a_{12}(x_2 - b - x, y_2 - b - y)dxdy \quad (3.33)$$

$$\text{где } \beta_{12}(x_2, y_2) = \iint_{uv} R_1(u, v)R_2^*(u, v)\exp[-i2\pi(x_2u + y_2v)]dudv \quad (3.34)$$

Комплексно-сопряженный фурье-образ пропусканий $r_2(x_2, y_2)$ имеет следующий вид.

$$R_2^*(u, v) = \sum_{n=1}^M \exp([-2\pi i(x_n u + y_n v)]) \exp[i\psi(x_n, y_n)] \quad (3.35)$$

Используя соотношения (3.26) и (3.32), мы можем записать произведение $R_1(u, v)R_2^*(u, v)$ в виде :

$$R_1(u, v)R_2^*(u, v) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \exp[i2\pi((x_m - x_n)u + (y_m - y_n)v)] \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \psi(x_n, y_n))] \quad (3.36)$$

Тогда с учетом соотношения (3.36) мы можем записать (3.34) в виде:

$$\beta_{12}(x_2, y_2) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \delta[x_2 - (x_m - x_n), y_2 - (y_m - y_n)] \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \psi(x_n, y_n))] \quad (3.37)$$

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

$$e_{12}(x_2, y_2) = \iint_{xy} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \delta[x - (x_m - x_n), y - (y_m - y_n)] a_{12}(x_2 - b - x, y_2 - b - y) \cdot \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \psi(x_n, y_n))] dx dy \quad (3.38)$$

Отсюда следует, что

$$e_{12}(x_2, y_2) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M a_{12}(x_2 - (x_m - x_n), y_2 - (y_m - y_n)) \cdot \exp[i(\varphi(x_m, y_m) - \psi(x_n, y_n))] \quad (3.39)$$

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

$$e_{12}(x_2, y_2) = 0 \quad \text{при} \quad x_m - x_n < b, y_m - y_n < b \quad (3.40)$$

Из выражений (3.40) 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 .

3.5. Экспериментальное исследование селективности схемы с дискретной разверткой опорного пучка вокруг предметного пучка

При использовании автоматизированном способе записи мультиплексированных спекл-голограмм при экспериментальном исследовании селективности схемы с дискретной разверткой опорного пучка вокруг предметного пучка с использованием маски с окошком записываем четыре голограммы в одной точке, при котором каждый опорный пучок имеет свое распределение. Автоматизированный способ записи описан в главе 4.. Первую голограмму записываем со следующими координатами окошка $x_1=0$, $y_1=b$, где b - расстояние от центра координаты x_1y_1 до центра окошка. При этом угол поворота маски с окошком $\varphi=0$, вторую голограмму записываем со следующими координатами окошка: $x_1=-b$, $y_1=0$, в данном случае угол поворота маски с окошком $\varphi=90^0$, третью голограмму записываем со следующими координатами окошки $x_1=0$, $y_1=-b$ угол поворота маски с окошком $\varphi=180^0$, четвертую голограмму записываем со следующими координатами окошки $x_1=b$, $y_1=0$ угол поворота маски с окошком $\varphi=270^0$.

Во всех этих случаях транспарант не изменяет свои первоначальные координаты.

Размещение транспаранта и маски с окошком показано на рис.3.4.

Автоматизированный способ исследования селективности осуществлялся по измерениям зависимости интенсивности дифрагированного поля от пространственного рассогласования структур зарегистрированной опорной и считывающей волн, при этом рассогласование структур происходило за счет поворота маски с окошком вокруг оси Z .

Экспериментальные и расчетные данные заносим в таблицу 3.1 и строим график зависимостей. Зависимость, позволяющая сделать, вывод о селективности предложенной схемы показана на рисунке 3.6.

Таблица 3.1

№ п/п	параметры	Единица измерения	1-я измерения	2-я измерения	3-я измерения	4-я измерения
1	I_d -	мВт/см ²	1.12	0.448	0.224	0.112
2	I_0	мВт/см ²	1.12	1.12	1.12	1.12
3	I_d / I_0		1	0.4	0.2	0.1
4	φ	градус	0°, 360°	30°, 330°	60°, 300°	90°, 135°, 180°, 225°, 270°

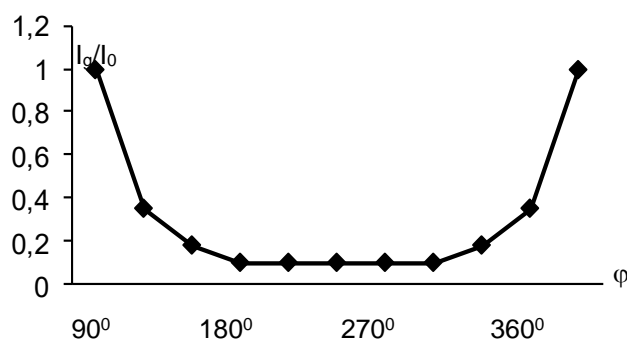


Рис.3.6. Экспериментальная зависимость позволяющая определять селективность предложенной схемы.

К достоинству предложенной схемы относятся:

- из рисунка 3.6 видно, что голограммы частично налаживаются, равна нулю. Так, как мультиплексирование осуществляется при одной установке носителя без всяких изменений;
- неизменность геометрии освещения диффузора на этапе записи для ряда голограмм;
- мультиплексирование голограмм можно осуществить в тонких регистрирующих средах;
- предложенный автоматизированный способ прост и надежен.

3.6. Автоматизированный способ экспериментального исследование зависимости дифрагированного поля от освещаемой площади диффузора

С применением автоматизированного способа проведены экспериментальные исследования зависимости интенсивности дифрагированного поля от освещаемой площади “S” диффузора, при постоянной интенсивности излучения в плоскости диффузора. Схема позволяющая снять такую зависимость рассматриваются в главе 4. Схема диффузора позволяющая снять такую зависимость показана на рис. 3.7. Экспериментально полученные данные и результаты расчета заносим в табл. 3.2. На рис.3.8 приведена зависимость нормированной интенсивности дифрагированного поля от нормированной освещаемой площади “S” диффузора.

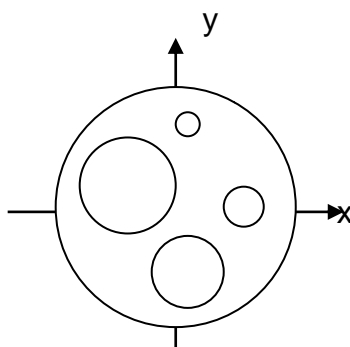


Рис.3.7. Диффрагма.

Таблица 3.2

№ п/п	Параметры	Единица измерения	1-я измерения	2-я измерения	3-я измерения	4-я измерения
1	S	мм	0.6	1.5	2.4	3
2	S_0	мм	3	3	3	3
3	S/S_0		0.2	0.5	0.8	1
4	I_d	мВт/см ²	0.448	0.672	0.896	1.12
5	I_0	мВт/см ²	1.12	1.12	1.12	1.12
6	I_d/I_0		0.4	0.6	0.8	1

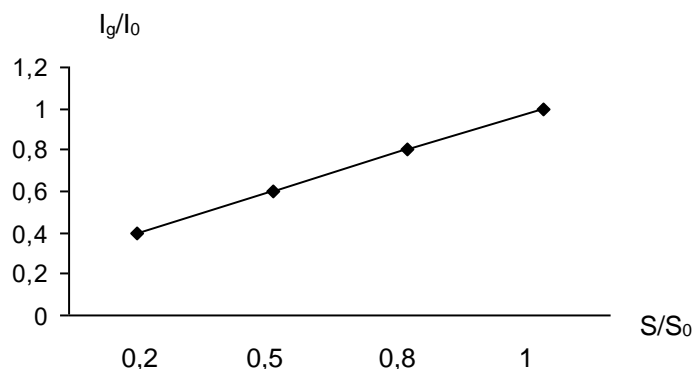


Рис.3.8. Зависимость нормированной интенсивности дифрагированного поля от нормированной освещаемой площади S/S_0 диффузора.

Из графика видно, что чем больше освещаемой площадь диффузора “S”, тем ярче становится выходное изображение.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

В главе 3 рассмотрен новый способ записи мультиплексированных спекл- голограмм с дискретной разверткой опорного пучка вокруг предметного по образующей конуса, при котором для каждой развертки опорные пучки обладают различными случайными фазовыми распределениями.

1. Теоретически полученное выражение комплексной амплитуды восстановленного изображения в выходной плоскости для первой голограммы означает, что комплексная амплитуда восстановленного изображения в выходной плоскости представляет собой свертку функции комплексно-спеклового пропускания транспаранта с корреляционной функцией опорной и восстанавливающей волн. При этом получаем неискаженное изображение выходного транспаранта, если корреляционная функция опорной и восстанавливающей волн представляет собой δ - функция. Это достигается, когда опорные и восстанавливающие волны абсолютно идентичны, что определяет селективности записанных голограмм.

2. Из полученного выражения комплексной амплитуды восстановленного изображения с учетом действия диффузора следует, что при постоянной

интенсивности излучения в плоскости диффузора с увеличением освещаемой площадью “S” диффузора линейно возрастает величина комплексной амплитуды восстановленного изображения и площадь фона вокруг изображения в выходной плоскости.

3. Для определения селективности записанных голограмм рассмотрен процесс восстановления первой голограммы при считывании второй голограммы. Из полученного выражения комплексной амплитуды первой голограммы следует, что восстановление первой голограммы в начале координат выходной плоскости $x_2=0$, $y_2=0$ не будет.

4. Экспериментальное исследование селективности голограмм предложенного метода осуществлялось по измерению зависимости интенсивности дифрагированного поля от пространственного рассогласования структур зарегистрированной опорной и считывающей волн. При этом увеличение угла рассогласования с поворотом маски с окошкой от первоначального состояния приводит к резкому падению уровня дифрагированного поля. С увеличением освещаемой площадью “S” диффузора, при постоянной интенсивности излучения в плоскости диффузора, ярче становится выходное изображение, т.е. увеличивается уровень интенсивности выходного изображения.

5. К достоинству метода относятся:

- мультиплексирование осуществляется при одной установке носителя без всяких дальнейших изменений;
- геометрия освещения диффузора на этапе записи остается неизменной для ряда голограмм;
- регистрирующая среда не обязательно должна быть толстой, мультиплексирование голограмм можно осуществить и в тонких регистрирующих средах;
- предложенный автоматизированный способ прост и надежен.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЕ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

4.1. Разработка универсального автоматизированного устройства управления записью/восстановления голограмм для голографических установок

Для повышения качества записи и восстановления голограмм, с целью устранения недостатков традиционного способа записи с низкой скоростью предлагается универсальное автоматизированное устройство для записи и восстановления голограмм с возможностью контроля качества голограммы в реальном масштабе времени.

С этой целью автором было разработано универсальное устройство управления, осуществляющее запись и восстановление голограмм с возможностью контроля качества голограмм в реальном масштабе времени, а также прерывание этих процессов по заданной программе от компьютера [34,37].

Структурная схема предлагаемого автоматизированного устройства приведена на рис.4.1. Устройство состоит из следующих блоков: компьютер-21-предназначен для выдачи управляющих сигналов с LPT порта на цифровой блок и для обработки данных поступающих от приборов, измеряющих интенсивность излучения; цифровой блок-20 управляет всеми узлами устройства; лазер-1 типа ЛГН-503 (Ar^+ , $\lambda = 488$ нм) с мощностью непрерывного излучения до 1 Вт используется в качестве источника света; светоделитель-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; датчики ИМО-9,10,12,16 используются для измерения интенсивности светового излучения; регистрирующая среда-11 используется 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. Рассмотрим принцип работы системы автоматизированного управления в голографических установках.

Рассмотрим принцип работы системы автоматизированного управления в голографических установках. Сначала все элементы данного устройства находятся в пассивном состоянии, т. е. они не задействованы, проще говоря, еще не включены:

I. Для записи спекл-голограммы без сенсibilизации регистрирующего слоя задействованы следующие элементы данной схемы: лазер 1, светоделитель 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 через разработанную нами программу, и начинается запись голограммы. Лазерный луч I_0 , проходя через светоделитель 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 [14,32]. 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.

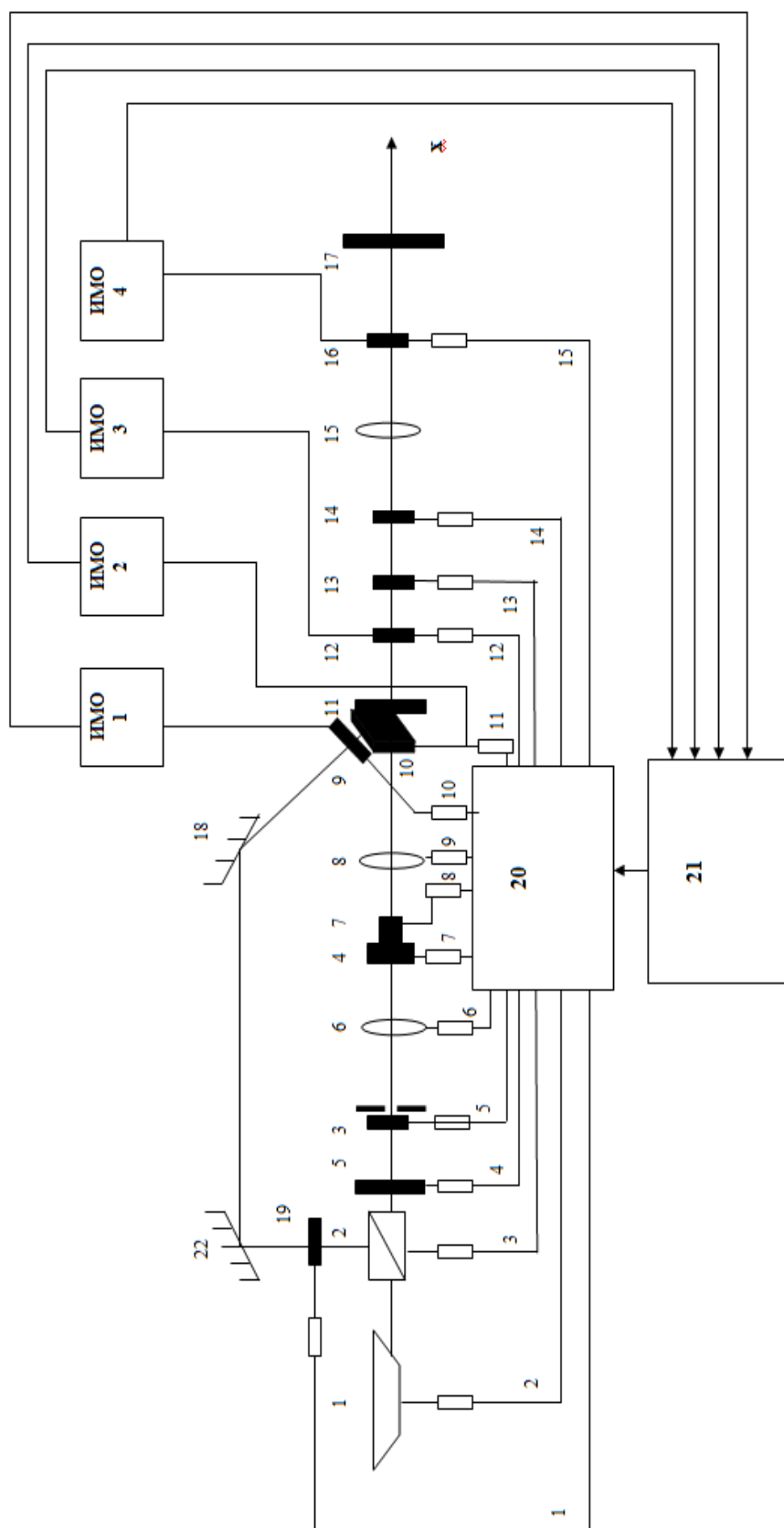


Рис. 4.1. Автоматизированная система управления в голографических установках : 1-лазер; 2- светоделитель; 3 – диффузор с диафрагмой; 4 – маска с окошком; 5 и 19 – электромагнитный прерыватель; 6,8 и 15 – линзы; 7 – транспарант; 9,10,12 и 16 датчики ИМО; 11 – регистрирующая среда; 13 – маска для измерения шума; 17 – экран; 14 – маска для измерения сигнала; 18 и 22 – зеркала; 20 – цифровой блок; 21 – компьютер.

II. Для записи спекл - голограммы с сенсibiliзацией регистрирующего слоя опорным пучком будут задействованы следующие элементы данной схемы: лазер 1; светоделитель 2; диффузор с диафрагмой 3; линзы 6, 8; транспарант 7; электромагнитные прерыватели 5, 19; цифровой блок 20 [33]; компьютер 21. Для сенсibiliзации поверхности регистрирующей среды запускается цифровой блок 20; лазер 1; цифровой блок программно устанавливает в нужное положение светоделитель 2, диффузор с диафрагмой 3, электромагнитный прерыватель 5, линзы 6, 8, транспарант 7. Лазерный луч I_0 проходя через светоделитель 2 делится на две части I_1 и I_2 . Путь лучу I_2 преграждает электромагнитный прерыватель 5 и 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.

III. С помощью данной автоматизированной системы управления можно измерять энергии экспонирования в схеме с точной Фурье-голограммой и с использованием диффузора с диафрагмой. Для этого с помощью датчиков 9, 10 и ИМО1, ИМО2 измеряем интенсивности световых лучей I_1 и I_2 и их сумму умножаем на время экспонирования и получаем энергию экспонирования голограммы ($E=(I_{оп}+I_{пр})t_{эк}$). Для получения разных энергий экспонирования будем изменять время экспонирования.

IV. Для измерения такого параметра как дифракционная эффективность используем датчики 9,12 ИМО1, ИМО3. С помощью датчика 9 и ИМО1 измеряем интенсивность восстанавливающей волны, а с помощью датчика 12 и

ИМОЗ измеряем интенсивность дифрагированной волны. Отношение дифрагированной волны к восстанавливающей волне дает дифракционную эффективность голограммы.

V. Для измерения интенсивности сигнальной волны используем маску 14, линзу 15, датчик 16, ИМО4. Интенсивность луча информационной единицы, проходя через маску попадает к собирающей линзе, а потом к датчику 16 и через ИМО4 к LPT порту компьютера. Для измерения интенсивности шума используется соответствующая маска 13, линза 15 и датчик 16 и через ИМО4 к LPT порту компьютера. Затем компьютер проводит обработку данных по заданной программе.

VI. С помощью данной автоматизированной системы управления можно измерять интенсивность опорной и предметной волны. Для измерения интенсивности опорной волны используется датчик 9 и ИМО1, а для измерения интенсивности предметной волны используется датчик 10 и ИМО2. С выхода ИМО1 и ИМО2 сигналы поступают на LPT порт компьютера и обрабатываются по заданной программе.

VII. С помощью предлагаемой автоматизированной системы 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.

В данной координате 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.

VIII. С помощью рассматриваемой системы автоматизации и управления реализуется технология мультиплексирования Фурье-голограмм спекл-полем. В данном случае рассматривались записи и восстановления мультиплексированных Фурье-голограмм спекл-полем. При записи первой голограммы угол поворота маски с окошком равен нулю, относительно оси “у”. При записи второй голограммы маску с окошком поворачиваем на угол 90^0 относительно оси “у”. Соответственно, данная опорная волна отличается от опорной волны при записи первой голограммы. Когда происходит запись третьей голограммы, по заданной траектории маску с окошком поворачивает на угол 180^0 относительно оси “у”. В данном случае также опорная волна отличается от опорной волны первого и второго случая. Во время записи четвертой голограммы по заданной траектории поворачивает на 270^0 маску с окошком относительно оси “у”. Здесь тоже, опорная волна имеет свою кодировку, т.е. отличается от предыдущей опорной волны [30]. Из вышесказанного следует, что при записи каждой голограммы, каждый раз опорный пучок кодируется по-разному, т.е. пространственно-модулирован по-разному, поэтому для восстановления записанных голограмм, освещаем регистрирующую среду восстанавливающей волной, идентичной опорной [29].

XI. Для получения такой характеристики как зависимости от нормированной интенсивности дифрагированного поля от угла поворота маски с окошком вокруг оси Z по заданной траектории движения поворачиваем маску с окошком от 0^0 до 360^0 с шагом 10^0 . При этом каждый раз измеряем интенсивность дифрагированной волны и интенсивность опорной волны, а отношение интенсивностей является нормированной интенсивностью дифрагированного излучения [19].

4.2. Разработка цифровых блоков для автоматизированного способа записи и мультиплексирования голограмм с последовательным и параллельным управлением.

Автором также предлагается цифровой блок последовательного управления для системы автоматизации и управления технологическими процессами в голографических установках.

Рассмотрим структурную схему цифрового блока во взаимодействии с компьютером, который приведенную на рис. 4.2.

Цифровой блок состоит из следующих узлов: узел согласования; инвертор; параллельный регистр-для промежуточного хранения данных используется; дешифратор; буферный блок. Персональный компьютер осуществляет программное управление работой цифрового блока, вырабатывая сигналы управления. При этом компьютер взаимодействует с цифровым блоком посредством LPT порта (параллельный порт), в котором задействованы следующие сигнальные линии: шины данных (D1-D8), сигналы “# Init” и “# strobe” (знак # - означает знак инверсии).

Выход LPT порта компьютера подключен к входу узла согласования. Узел согласования предназначен для согласования цепей с общим коллектором в персональном компьютере, со входом разработанного цифрового блока. Это достигается введением дополнительного питания к каждому из сигнальных выводов буферного регистра LPT порта.

С выхода узла согласования сигнал “Init” через инвертор поступает на вход параллельного регистра. Инвертор предназначен для приведения сигнала “Init” к логически верному значению. Такое решение принято для повышения скорости работы программы, т.е. при этом не требуется программного инвертирования при управлении, это важно также с точки зрения помехоустойчивости, так как инвертор является простым аналогом триггера Шмидта [25].

Сигналы данных Date1-Date8 с выхода узла согласования поступают на информационные входы регистра. Регистр промежуточного хранения данных, предназначен для синхронизации работы дешифратора и компьютера. Его основная функция заключается в обеспечении временного постоянства входных сигналов данных на входе шины данных дешифратора. Управление записью в данный регистр, происходит сигналом “Init”, сформированного с помощью компьютера и преобразованного инвертором.

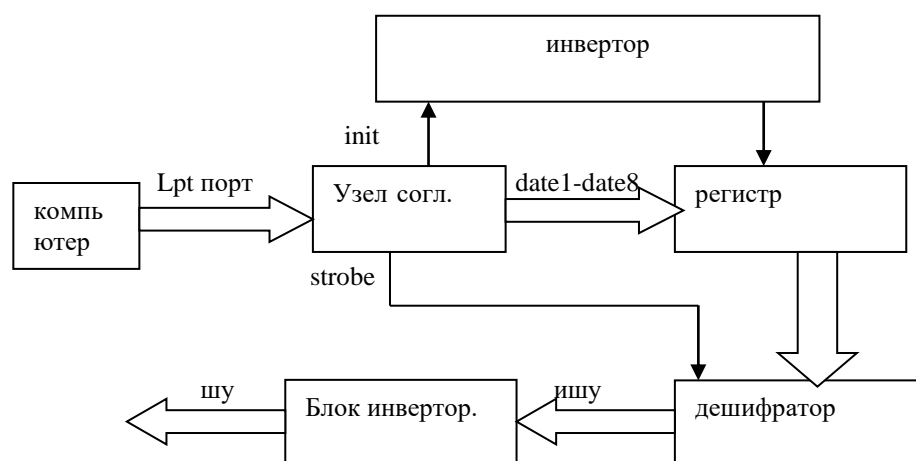


Рис.4.2. Структурная схема устройства управления

Сигнал “# strobe” с выхода узла согласования поступает на управляющий вход “С” дешифратора. А с выхода регистра промежуточного хранения через шины данных информационные сигналы поступают на вход дешифратора. Дешифратор предназначен для выбора (дешифровки) необходимого сигнала управления и подачи его на вход буферного блока. Дешифровка данных происходит синхронно с поступлением данных на шину данных цифрового блока. Отражение дешифрованных данных на инверсной шине управления происходит по команде “# strobe”, сформированной на компьютере, что обеспечивает высокую точность срабатывания управляющего устройства и его хорошую помехоустойчивость.

К выходу дешифратора подключен блок инверторов через инверсные шины управления. Блок инверторов предназначен для повышения нагрузочной способности в целом. Это реализуется посредством подключения “усилительного каскада” к маломощной линии управления.

На рис.4.3 показана временная диаграмма, отражающая работу универсального устройства управления на примере трех управляющих выходов.

Цифровой блок в взаимодействии с компьютером работает следующим образом: первоначально управляющие сигналы подаются на шины LPT порта, затем они согласовываются по уровню с цифровым блоком, после чего управляющие сигналы будут установлены на выходе узла согласования. Управляющие сигналы для регистрации с выхода узла согласования подаются на вход регистра, которые (сигнал # Init) мгновенно инвертируются в управляющие сигналы, записываемые в регистр, и они сразу же отображаются на его выходе. С выхода регистра управляющие сигналы поступают на вход дешифратора, где происходит операция дешифрирования, но дешифрированные управляющие сигналы не поступают на выход дешифратора. Такая процедура необходима, для синхронизации (для установки необходимых временных интервалов управления) и защиты его сбоя в работе. Дешифрированные управляющие сигналы отображаются на выходной шине дешифратора только при поступлении от узла согласования сигнала “strobe”, который разрешает отображение управляющих сигналов дешифратором. С выхода дешифратора управляющие сигналы поступают на вход буферного блока, где усиление мощности управляющих сигналов и корректировка логики срабатывания устройства.

Первый выход цифрового блока начинает работать в момент времени t_0 и заканчивает свою работу в момент времени t_1 , а в это время все остальные выходы не работают, т.е. они в пассивном положении. Далее с

момента времени t_1 до момента времени t_2 будет пауза (это пауза управляется программно, при необходимости её может и не быть). Выходы цифрового блока управляются аппаратно, т.е. в любой момент времени может работ один из шестнадцати выходов цифрового блока.

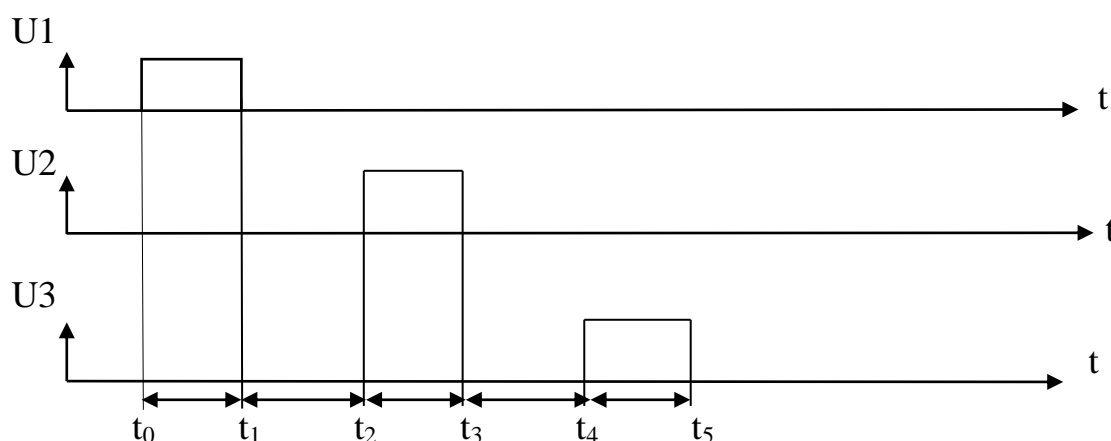


Рис.4.3. Временные диаграммы

Преимущество данного устройства — это возможность аппаратного управления процессами, а при этом имеется последовательный ход выполнения операций записи, считывания и контроля качества голограмм.

Отличительной стороной предложенного цифрового блока от существующих заключается в следующем. В данном цифровом блоке управление процессами записи и восстановления голограмм осуществляется программно. Данные управляющих сигналов с параллельного порта компьютера через блок согласования, поступают на входы параллельного регистра. При этом на синхронный вход регистра должен подаваться сигнал высокого уровня и на вход размыкания выходов регистра должен подаваться сигнал низкого уровня.

Структурная схема разработанного цифрового блока представлена на рис.4.4 и состоит из следующих блоков: А1 - компьютер, А2 - блок согласование, А3 - регистр, А4, А5 - инверторы.

Персональный компьютер осуществляет программное управление работой периферийных устройств, вырабатывая сигналы управления. При этом компьютер взаимодействует с устройством управления с помощью LPT порта, в котором задействованы следующие сигнальные линии: шины данных Date1-Date8, сигналы “#strobe”, “#Init” и “Autofeexdt”. Выход LPT порта компьютера подключен к входу узла согласования. Узел согласования предназначен для согласования цепей с общим коллектором в ПЭВМ со входом разработанного периферийного устройства. 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 верному логическому значению. Такое решение принято для повышения скорости работы программы.

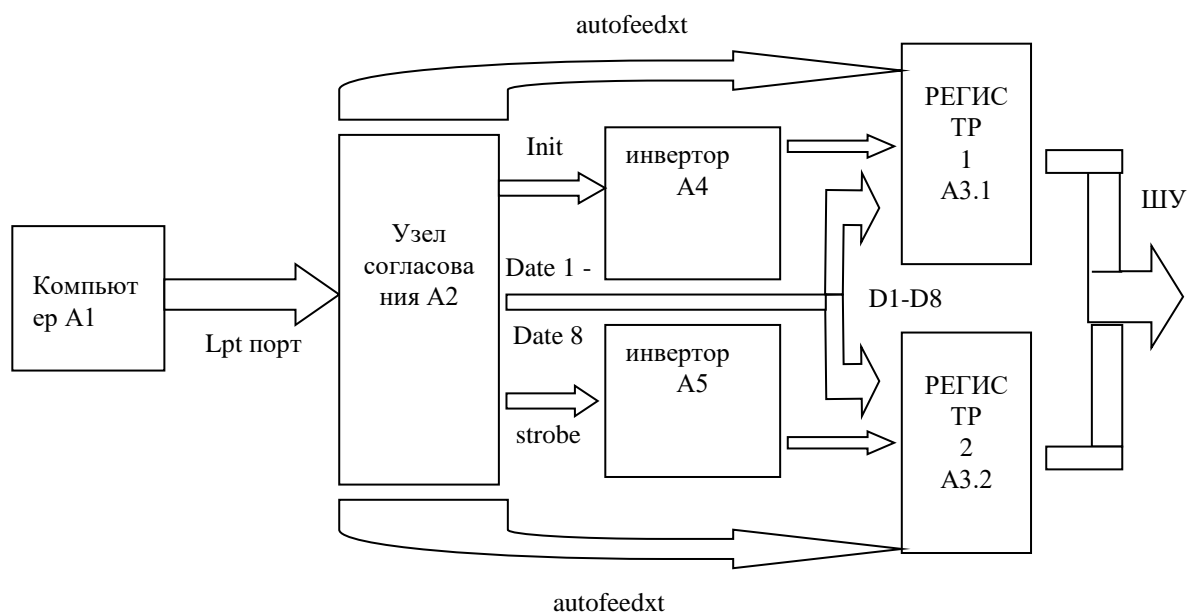


Рис.4.4. Структурная схема устройства управления

Сигналы данных Date1-Date8 с выхода узла согласования поступают на информационные входы регистра. 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, устройство управления 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 информационный вход регистра. По переднему фронту тактового сигнала информация запишется на параллельных входах регистра. Временные диаграммы, показывающие работу данного устройства показаны на рис.4.5. Временные диаграммы, показывающие работу данного цифрового блока, показаны на примере трех выходов данного устройства. В момент времени t_0 начинает работать один из выходов, а в момент времени t_1 начинает работать второй выход, а в момент времени t_2 начинает работать третий выход.

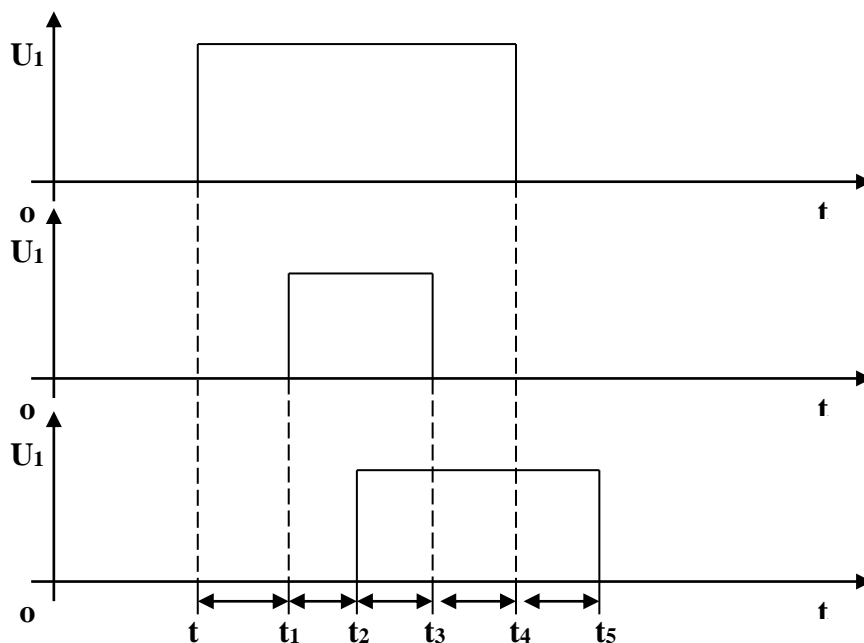


Рис.4.5. Временные диаграммы

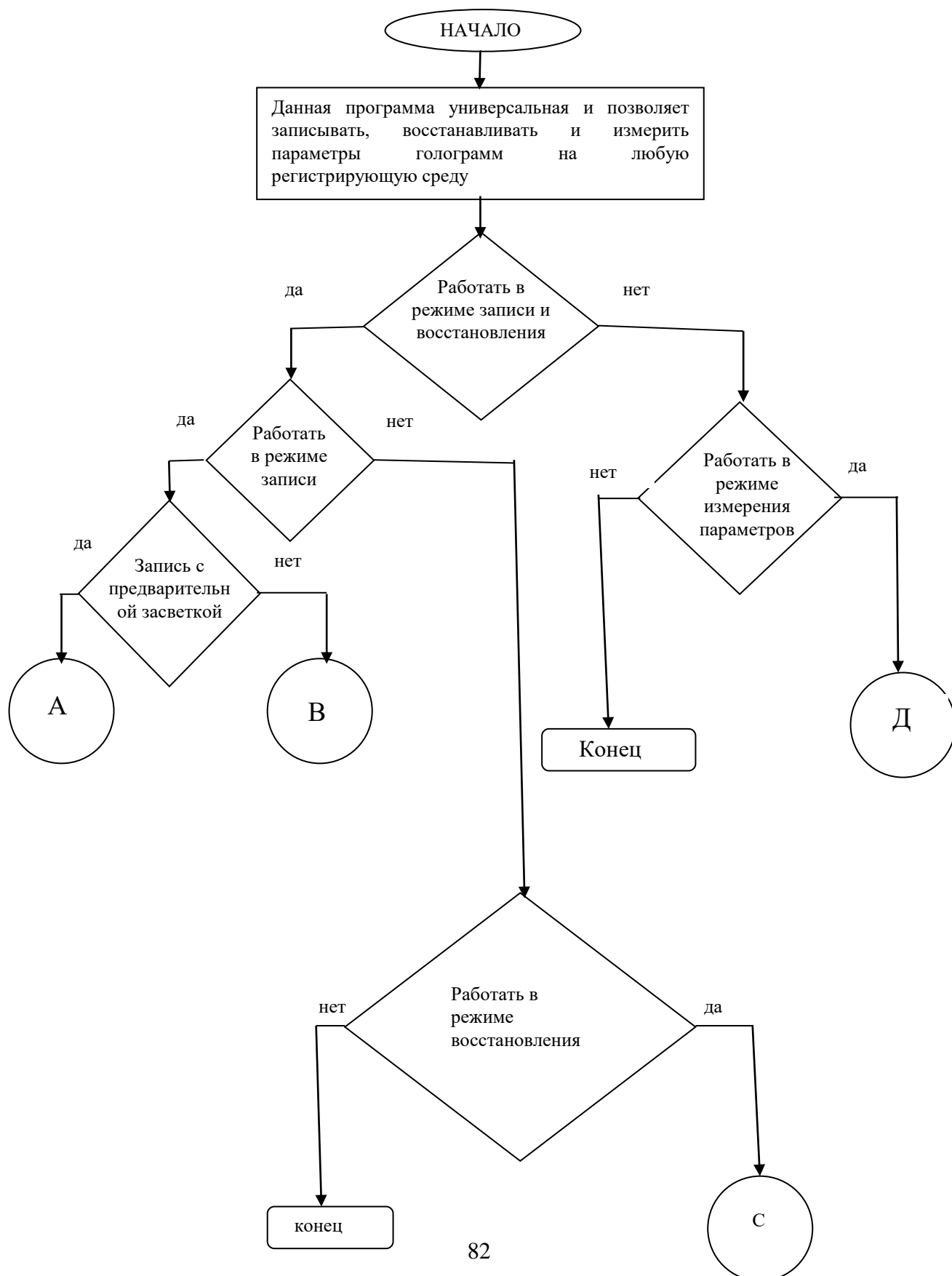
В момент t_3 второй выход закончит свою работу, а выходы 1 и 3 в работающем состоянии. В момент времени t_4 закончит работу первый выход, а третий выход работает. В момент t_5 закончит работу третий выход. Так как в данном случае управление осуществляется программно, временные диаграммы данного устройства зависят от программы [25].

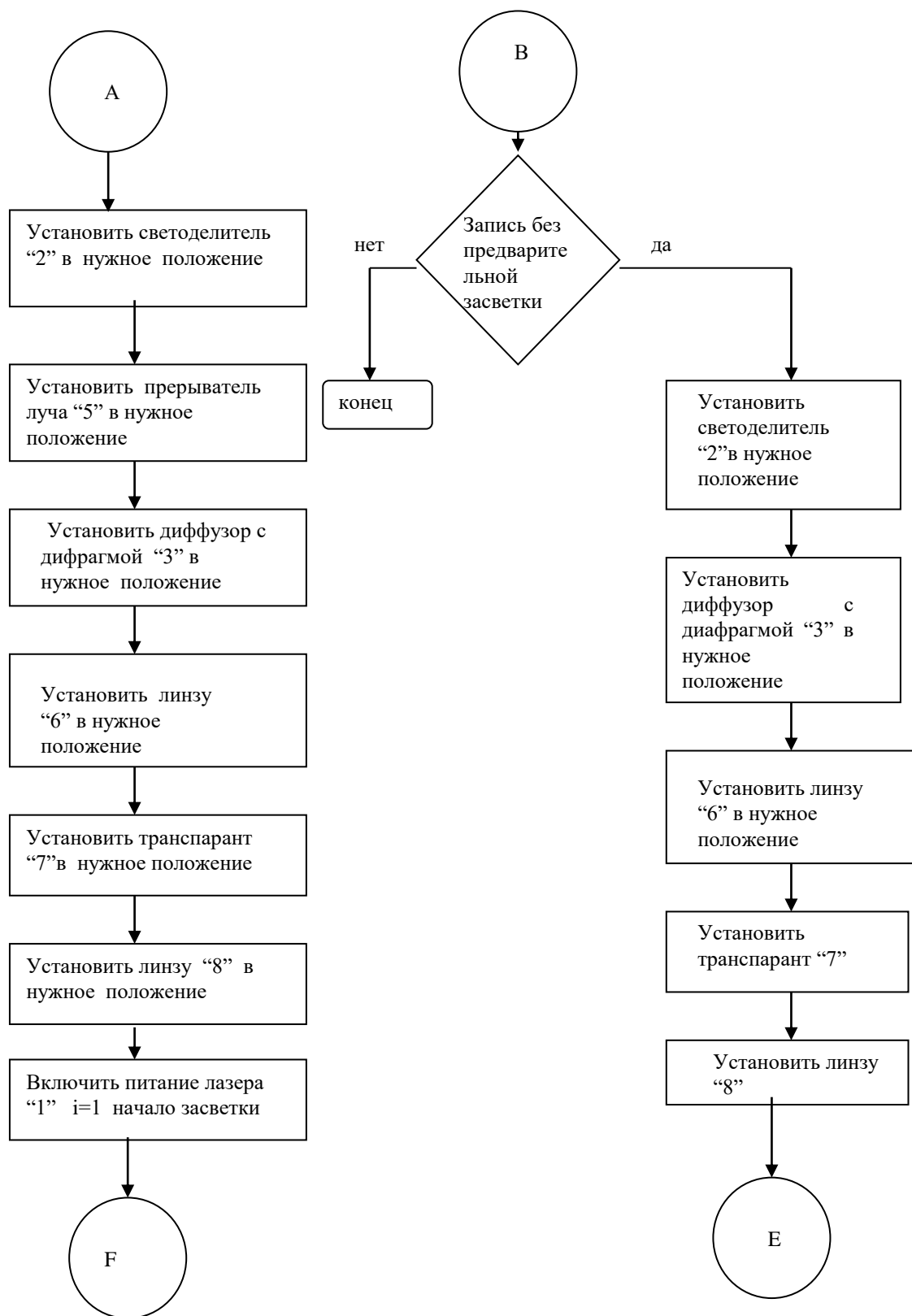
Преимуществами предложенного варианта устройства управления являются: 1) устройство функционирует программно; 2) надежность устройства и простота.

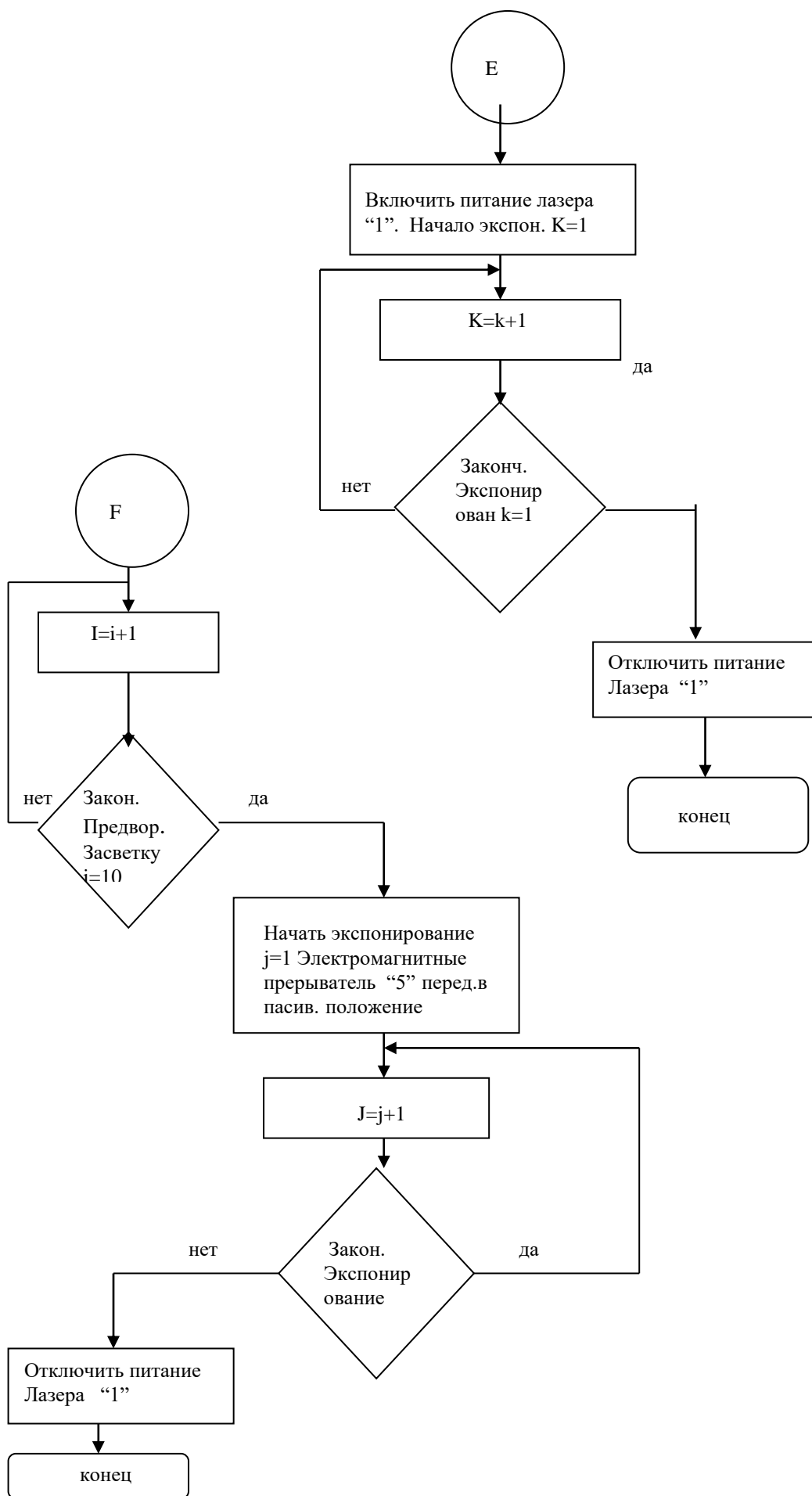
4.3. Разработка алгоритма управления технологическими процессами в голографических установках.

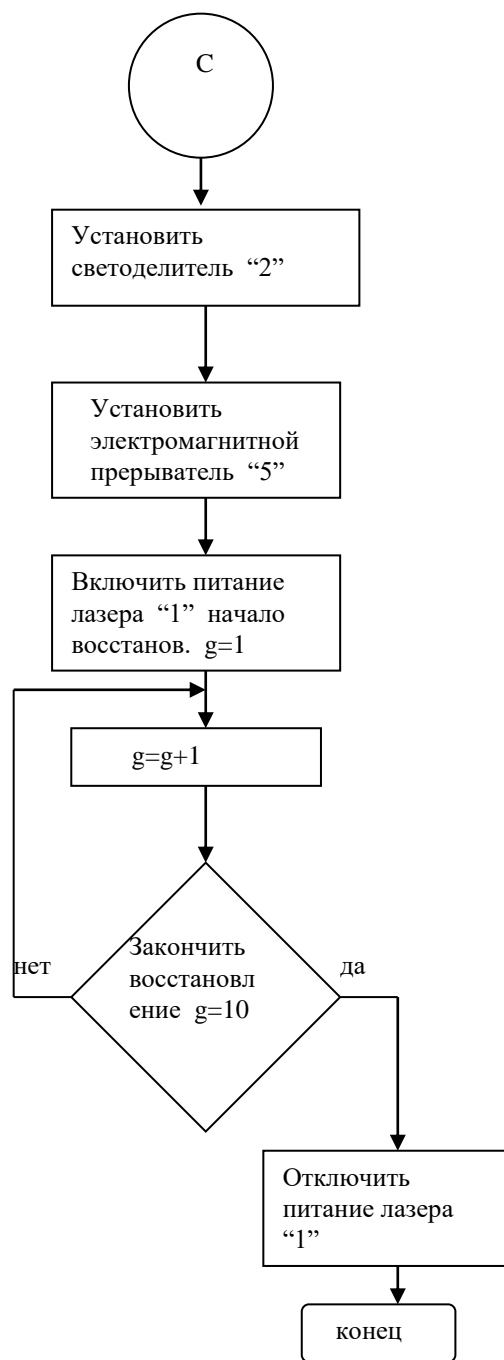
Задачи разработки автоматизированного способа управления технологическими процессами в промышленных предприятиях - одна из основных областей применения компьютерной технологии. В последнее время для автоматизации и оптимизации технологических процессов предприятий все чаще применяются новые программные продукты, призванные автоматизировать отношения внутри технологических цепочек и, таким образом, свести к минимуму человеческий фактор в принятии решений, оптимизировать весь процесс управления записью и восстановлением, а также измерением параметров голограмм. Применение автоматизированных способов позволяет сосредоточиться на развитии стратегии процессов записи голограмм, передав автоматизированному способу записи все процессы восстановления и измерения параметров голограмм, которые можно алгоритмизировать. Напомним, что алгоритм управления – это последовательность команд по управлению объектом, которая приводит к заранее поставленной цели. Исходя из выше сказанного для автоматизированного способа записи разрабатываем алгоритм управления. Алгоритм управления, разработанный для автоматизированного способа

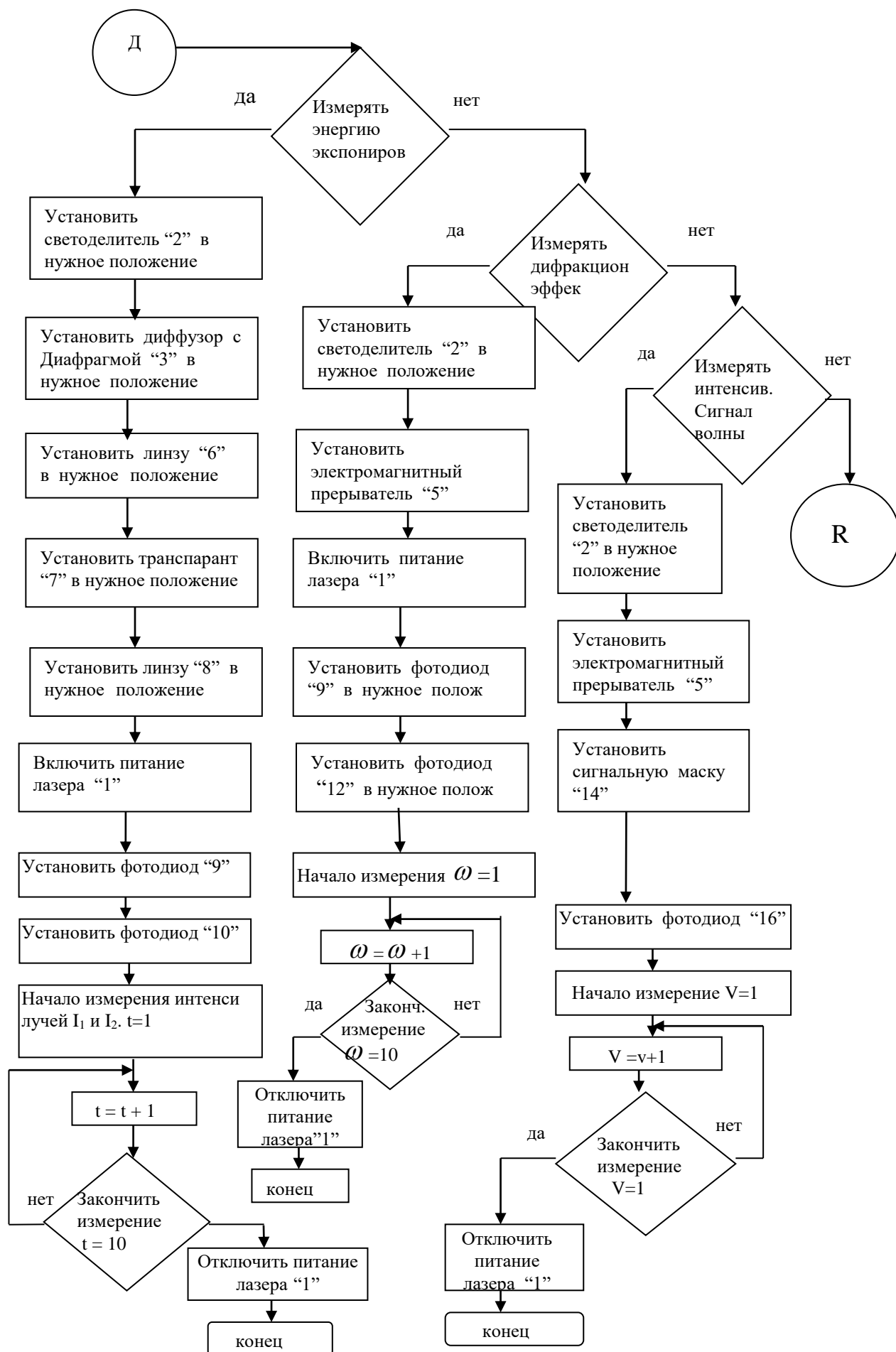
включает в себя линейные, разветвляющиеся и циклические алгоритмы управления.

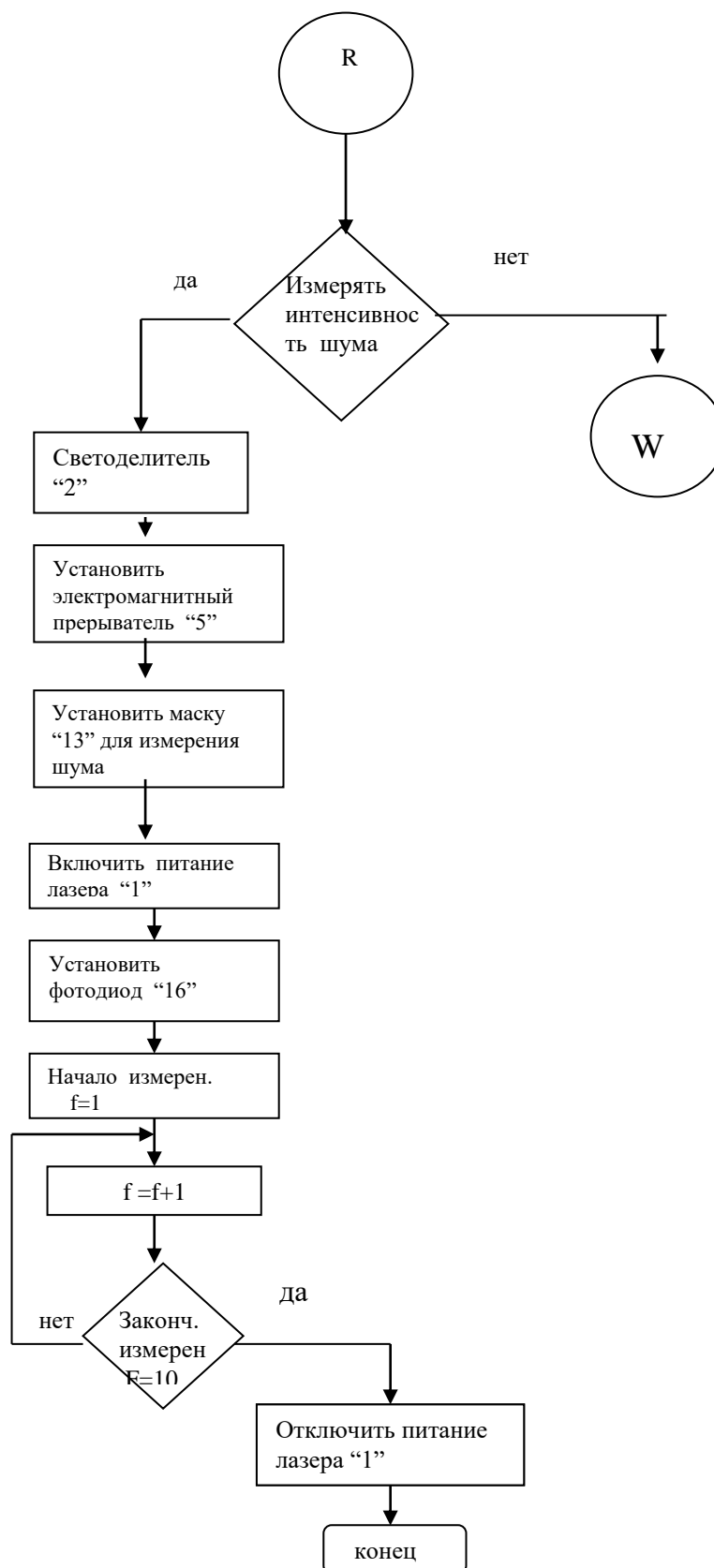


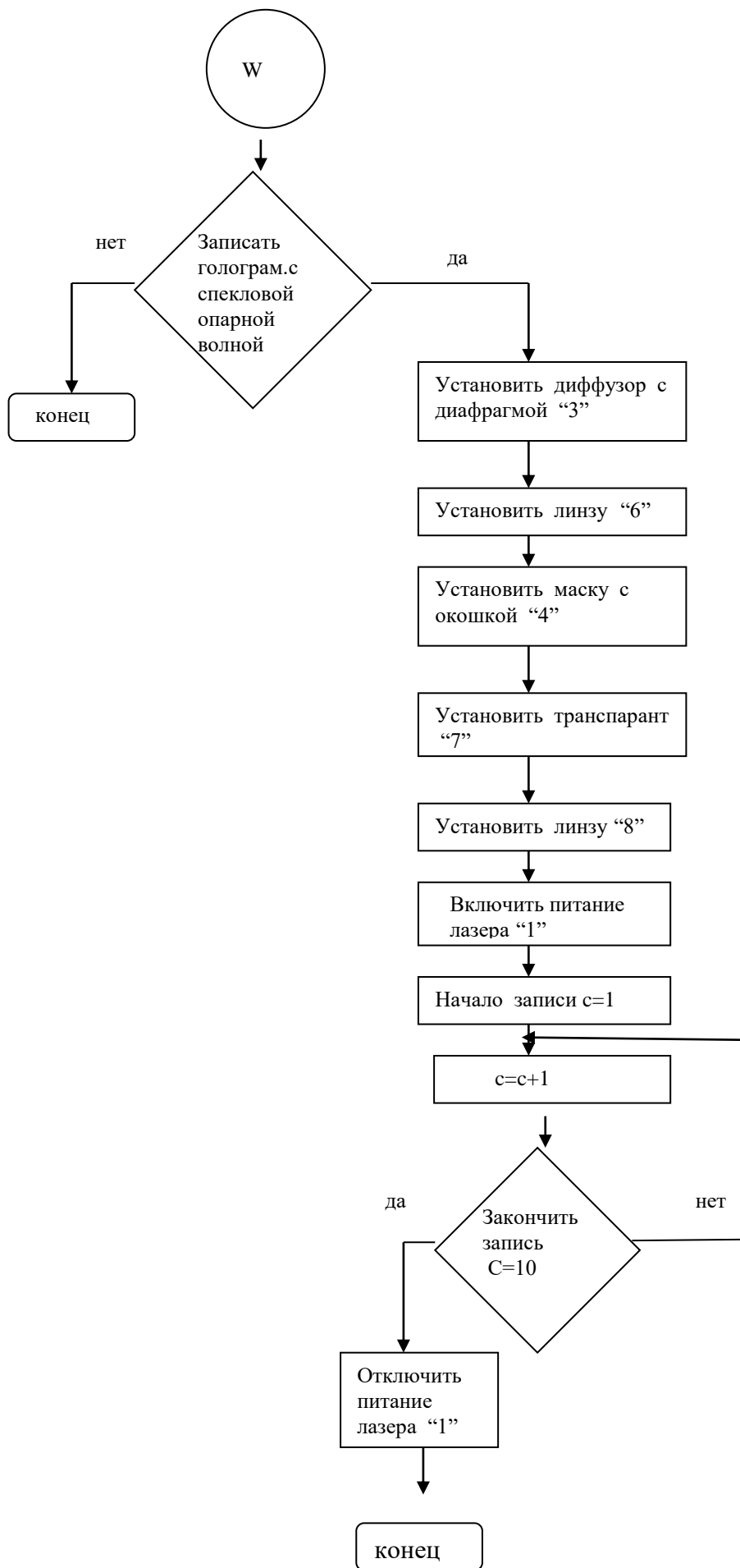












4.4. Алгоритм тестирования автоматизированного способа записи и автоматизированного способа мультиплексирования Фурье -голограмм спекл - полем.

Предложенная программа для системы автоматизированного способа записи и автоматизированного способа мультиплексирования Фурье-голограмм спекл-полем универсальная и может работать с любым голографическим устройством. Программа работает диалоговом режиме с пользователем. Применяя данную программу к любому голографическому устройству, можно записать любым способом голограмму, восстанавливать измерять параметры записанной голограммы на любую регистрирующую среду. А также можно записать и восстанавливать измерять параметры мультиплексированных голограмм спекл-полем. На рис. 4.6 показан скриншот начала работы программы.

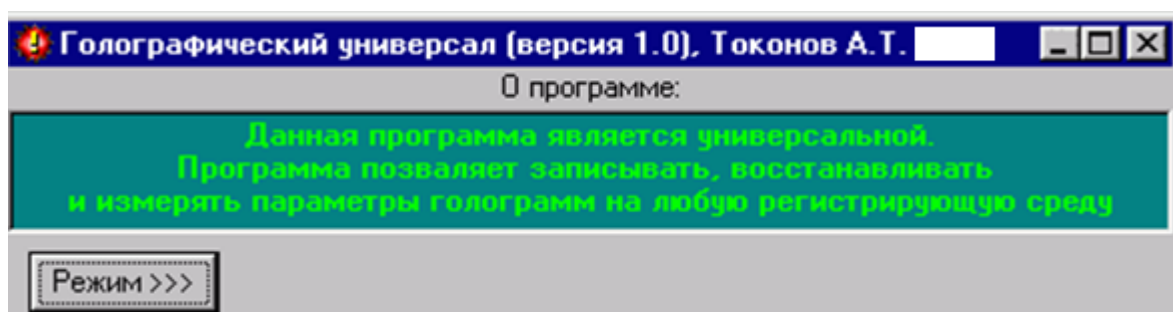


Рис.4.6. Начало работы программы

При нажатии кнопки «Режим» компьютер запросит в каком режиме работать, что показано на рис.4.7. Из предложенных режимов работы с помощью курсора выбираем нужный режим работы. Если закончить режим работы, то тогда с помощью курсора нажимаем на завершение работы.

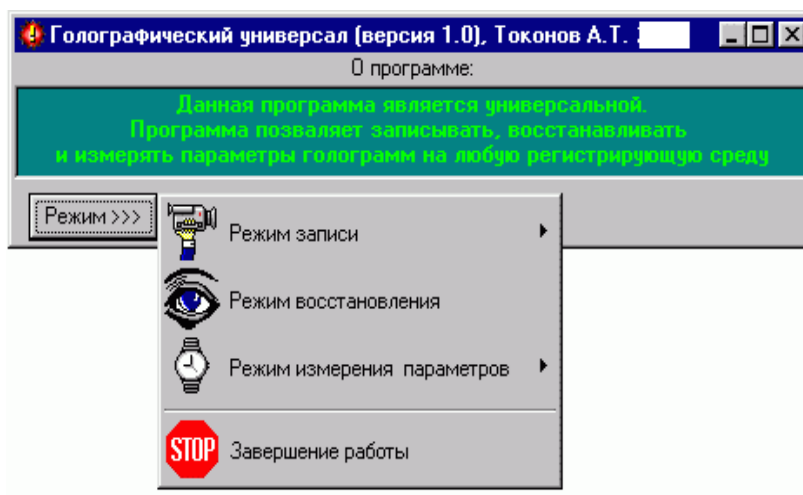


Рис. 4. 7. Выбор режима работы автоматизированного способа записи голограмм

Если необходимо работать в режиме записи тогда курсором нажимаем режим записи. В режиме записи имеется два режима с предварительной засветкой регистрирующего слоя и без предварительной засветки регистрирующего слоя. Это показано на рис. 4.8.

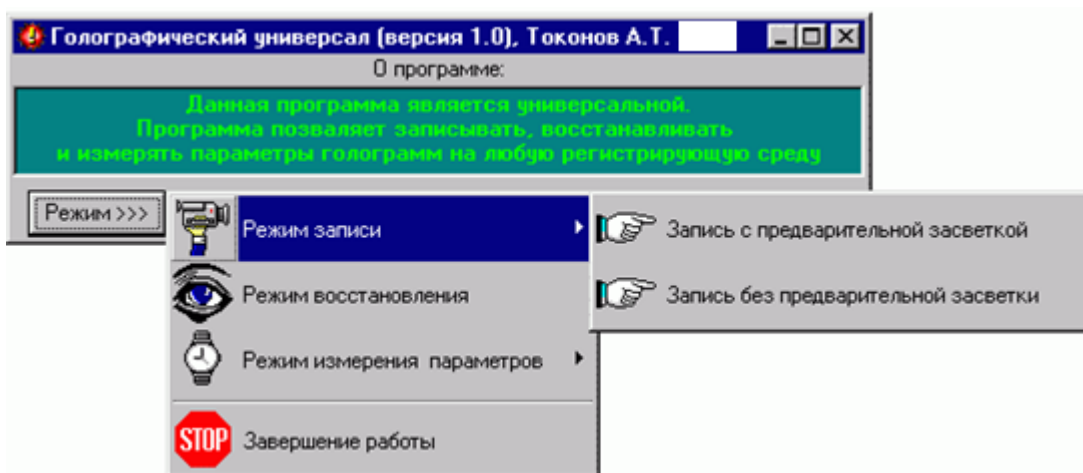


Рис.4.8. Автоматизированный способ в режиме записи

Если необходимо записать автоматизированным способом голограмму без предварительной засветки выбираем второй вариант. В таком случае на голографическом столе начинается установка необходимых элементов для записи голограмм без предварительной засветки регистрирующего слоя, что показано на рисунке 4.9.

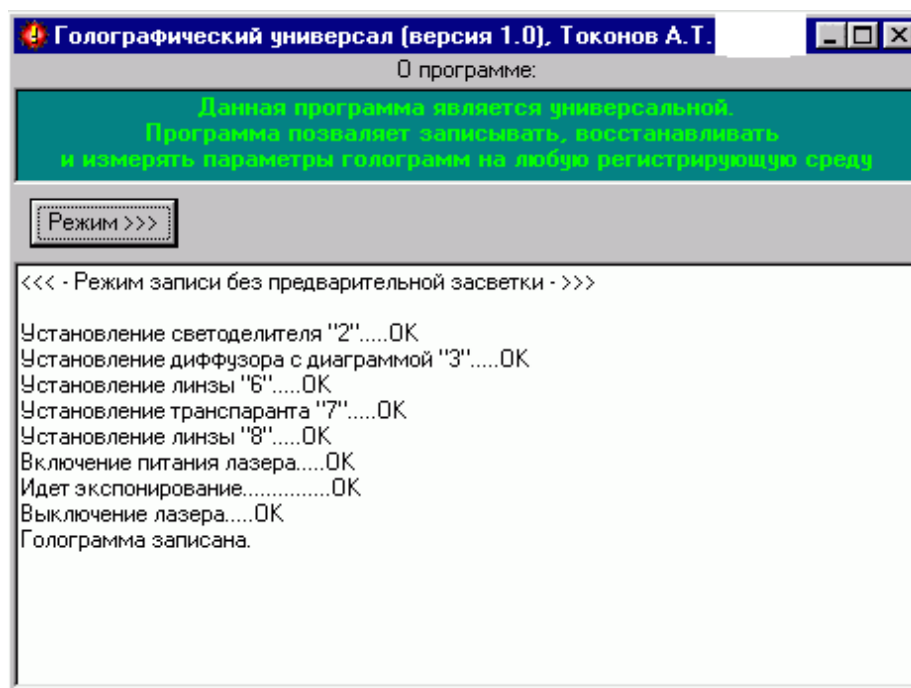


Рис.4.9. Режим записи голограмм без предварительной записи

Если необходимо записать автоматизированным способом голограмму с предварительной засветкой выбираем первый вариант. В таком случае на голографическом столе начинается установка необходимых элементов для записи голограмм с предварительной засветкой регистрирующего слоя, что показано на рисунке 4.10.

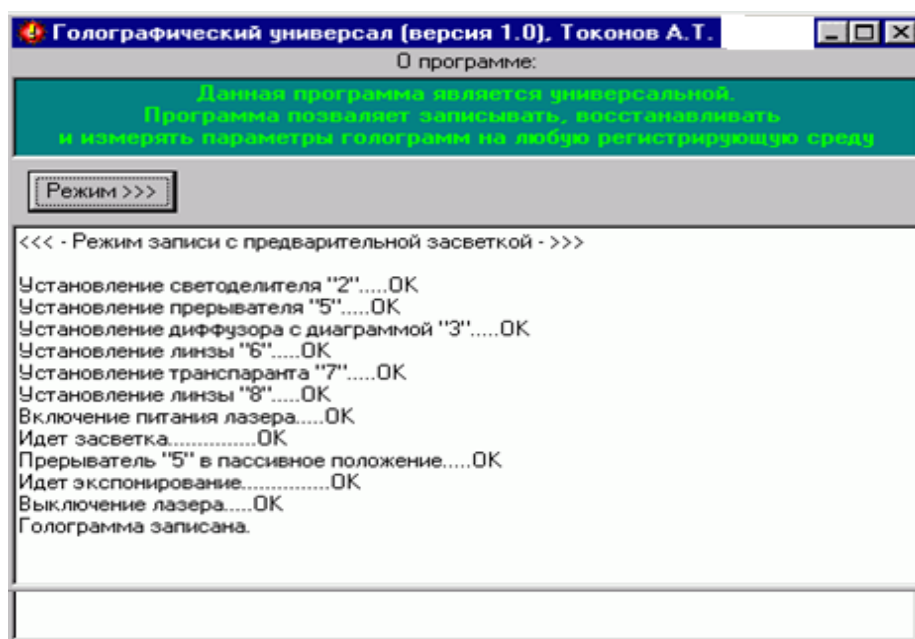


Рис.4.10. Режим записи голограмм с предварительной засветкой регистрирующего слоя.

Если нам необходимо измерить параметры записанной голограммы и записать голограмму спекловой опорной волной, то тогда переходим к режиму измерения параметров. В режиме измерения параметров имеется пять пунктов. Что показано на рис.4.11.

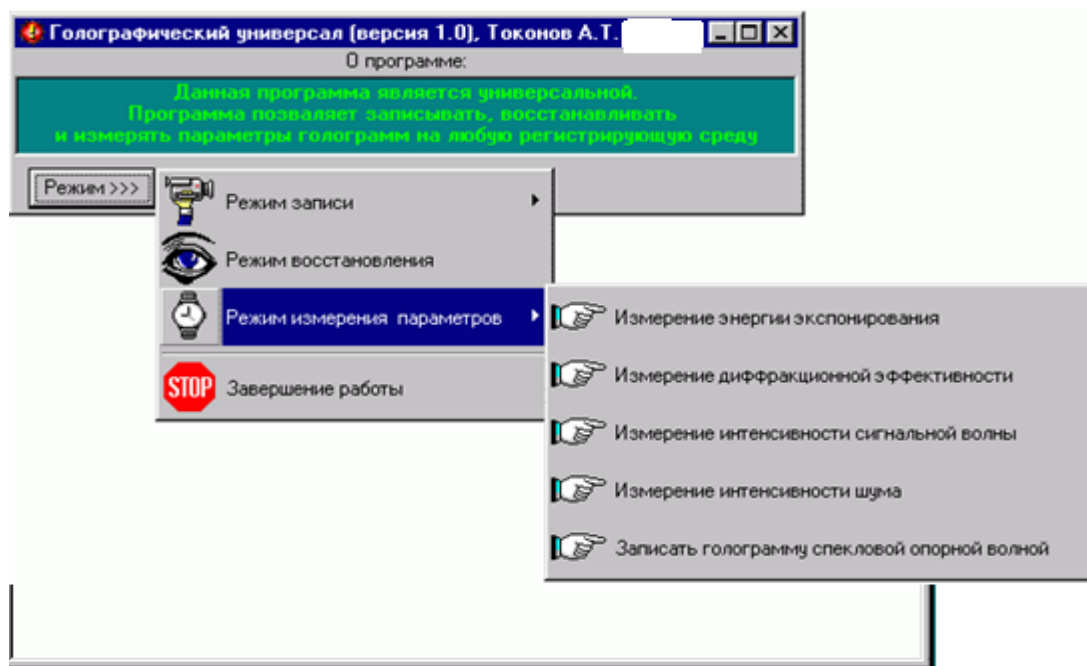


Рис.4.11. Режим измерения параметров и запись голограмму спекловой опорной волной.

На рис. 4.12. Показана как работает предложенная схема автоматизированного способа во время измерения энергии экспонирования.

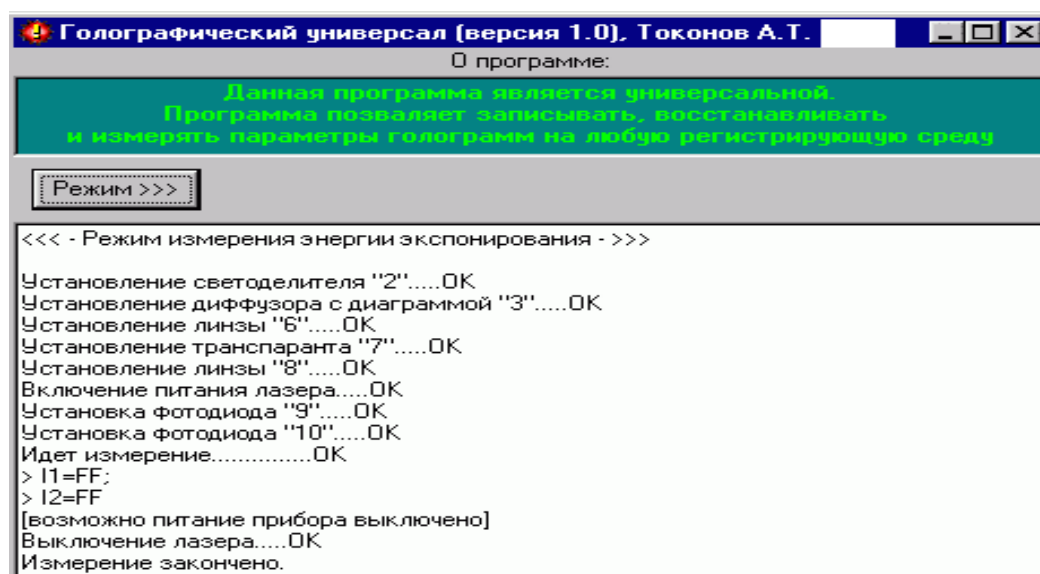


Рис.4.12 Режим измерения энергии экспонирования

На рис. 4.13 показано работа автоматизированного способа во время измерения дифракционной эффективности голограмм.

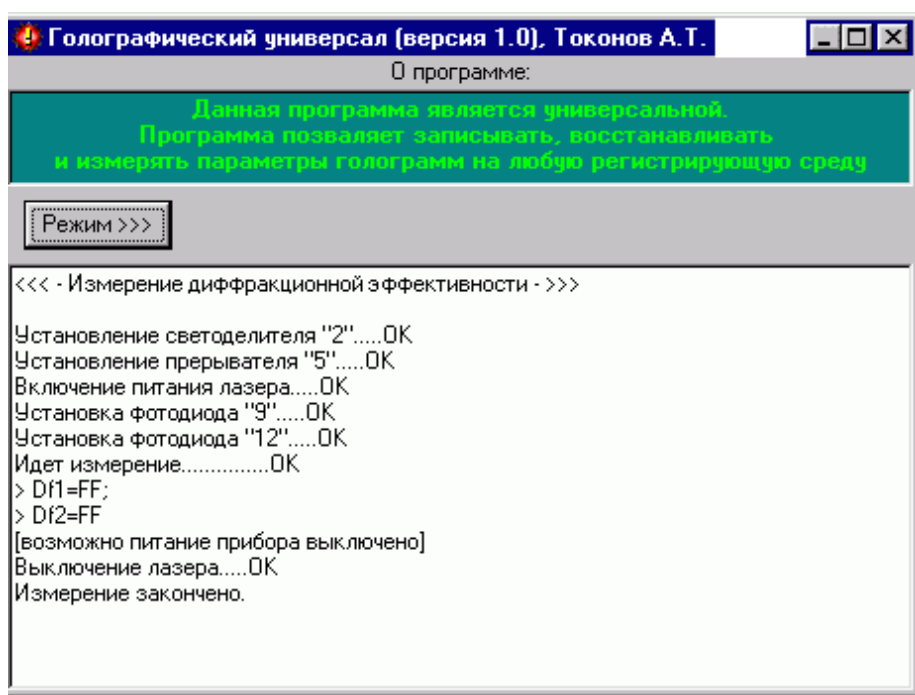


Рис.4.13 Режим измерения дифракционной эффективности

На рис. 4.14 показано предложенным способом измерение интенсивности сигнальной волны.

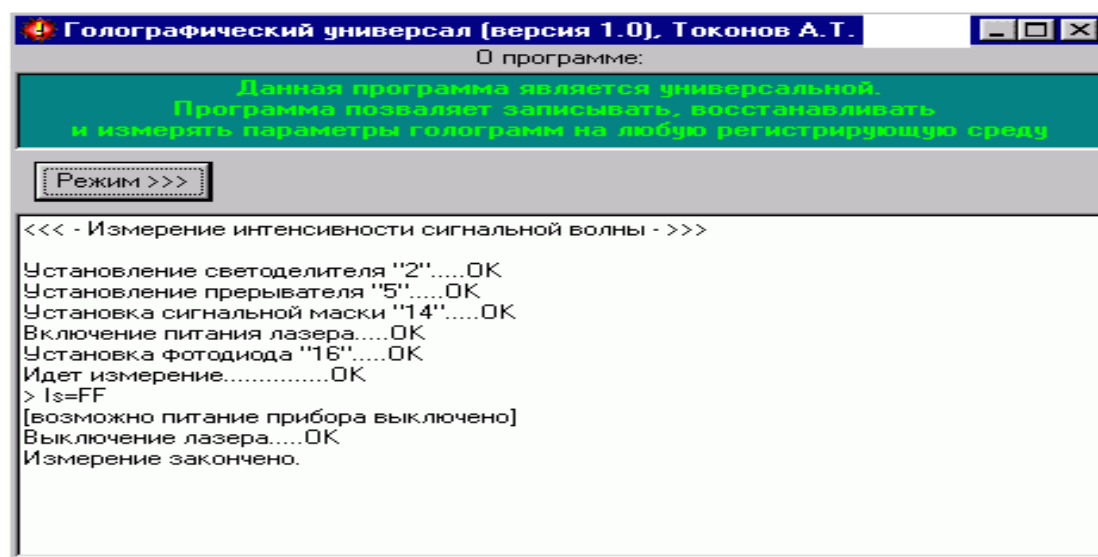


Рис.4.14. Измерение интенсивности сигнальной волны.

Для измерения интенсивности шума предложенном автоматизированным способе используем специальные маски что приведено в главе 2. А работа показано на рис. 4. 15.

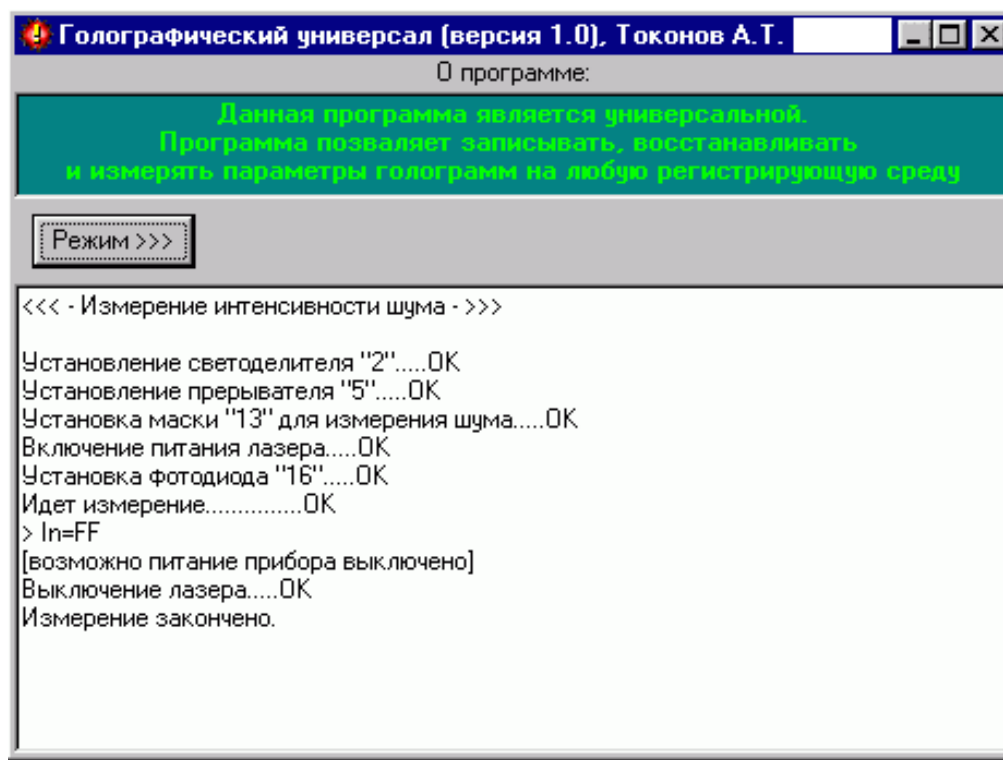


Рис.4.15. Измерение интенсивности шума.

Предложенный автоматизированный способ позволяет записать голограмму спекловой опорной волной. В данном случае светоделиитель не устанавливается в голографическом столе. В этом режиме можно записать мультиплексированную голограмму. Такой режим работы показана на рис.4.11.

Как видно из вышесказанного, с помощью автоматизированного способа 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.

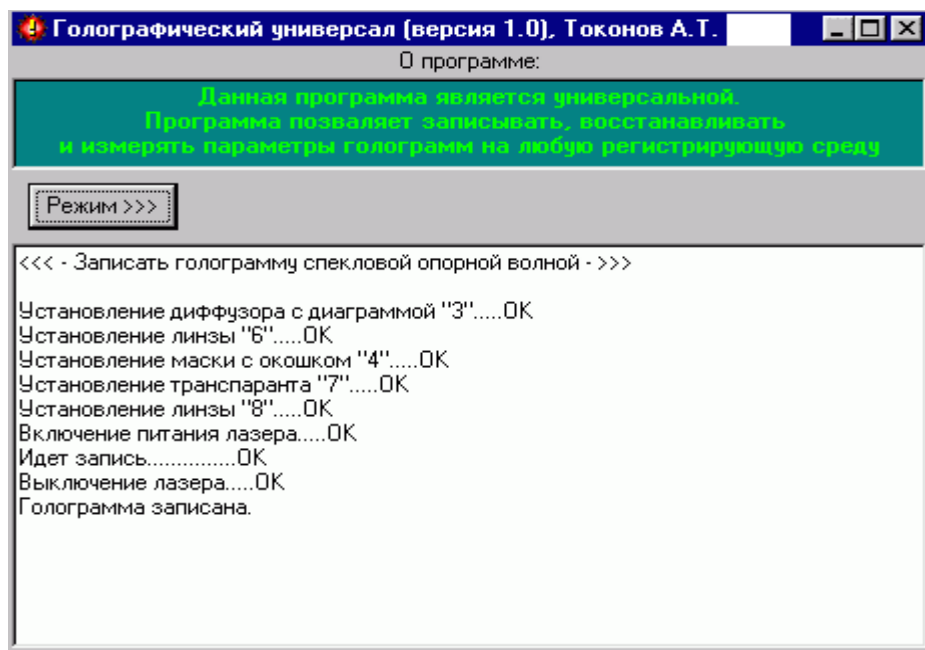


Рис.4.16. Автоматизированный способ записи голограмм со спекловой опорной волной.

Для окончания работы автоматизированного устройства нажимаем «Завершение работы», таким образом голографическом устройстве автоматизированный способ закончить свою работу. Что показано на рис. 4.17.

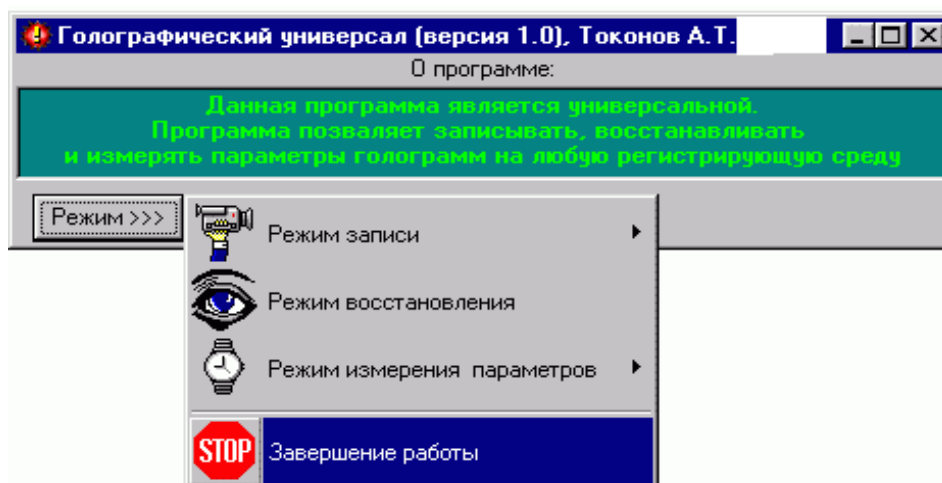


Рис. 4.17. Окончание режима работы.

Разработанное устройство может применяться для управления процессами записи и считывания различного рода голографической информации на регистрирующих средах любого типа, при этом устройство управления очень гибкое и обладает высокой надежностью.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4.

В четвертой главе приведена структурная схема разработанного способа автоматизированной записи и считывания голограмм в реальном масштабе времени с возможностью контроля качества голограммы. Предложенная система автоматизации и управления технологическими процессами и производством голографических изделий, позволяет производить запись и считывание информации с возможностью контроля качества голограммы в реальном масштабе времени, а также гибкое управление этих процессов по заданной программе от персонального компьютера.

Разработанное устройство может применяться для управления процессами записи и считывания различного рода голографической информации на регистрирующих средах любого типа, при этом устройство управления очень гибкое и обладает высокой надежностью.

Разработаны для системы автоматизации подходы синтеза на основе концепции обратных задач динамики для управляемых систем и метод синтеза и синтезированы соответствующие управляющие законы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В методе дефокусировки плоскость регистрации голограммы смещается от точной Фурье- плоскости на небольшое расстояние Δf , причем $\Delta f \ll f$. Благодаря этому удастся получить качественные амплитудные голограммы с дифракционной эффективностью 1-1,5%. Отношение сигнал/шум в изображении, восстановленном такой голограммой, равняется 20-30. Наряду с положительными качествами, дефокусировка приводит к следующим нежелательным последствиям: во-первых, снижается избыточность, во-вторых, увеличивается площадь голограммы и, следовательно, понижается плотность записи информации.

2. Метод случайной фазы имеет также ряд практических преимуществ во сравнение с дефокусировкой, в частности, упрощает процесс получения голограммы, снижает требования к качеству формирующих линз. Главное же преимущество указанного метода состоит в том, что он позволяет получить Фурье-голограммы высокой эффективности с сохранением максимальной избыточности и плотности хранения информации, характерной для Фурье - голограмм, записанных точно в Фурье-плоскости [5].

Однако изготовление фазовой маски и согласование ее с транспарантом технологически очень сложны.

3. Более совершенный метод - метод записи Фурье - голограмм спекл- полем, сохраняет все преимущества метода случайной фазы. Сущность этого способа заключается в установке диффузора с диафрагмой в плоскости x_1y_1 . Лазерный луч, прошедший через диффузор, является пространственно-модулированными световыми волнами. При этом дифракционная эффективность для спекл - голограмм достигает 20-25 %, а отношение сигнал/шум равняется 30 и более.

4. Из сравнении методов записи фурье-голограмм видно, что, метод записи фурье-голограмм спекл-полем является самым рентабельным. Исходя из выше сказанного следует что для разработки автоматизированного способа записи выбираем метод записи фурье-голограмм спекл-полем.

5. Разработан математическая модель автоматизированного способа сужения диапазона изменения интенсивности информационной световой волны в плоскости регистрации голограммы. Из полученного выражении описывающего распределение комплексных амплитуд информационной световой спекл волны в плоскости регистрации голограмм следует, что комплексная амплитуда спекл волны в пространственно-частотной плоскости голограммы 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.

6. Получен математическая модель автоматизированного способа восстановленной волны в выходной плоскости для случая когда опорные и восстанавливающие волны плоские и комплексно-сопряженные между собой откуда следует, что восстановленная волна совпадает с изображением транспаранта с учетом действия, диффузора и диафрагмы. При этом каждая точка диффузора создает квазифурье спектр транспаранта со своим фазовым множителем в плоскости голограммы. Следовательно, даже при узком Фурье-спектре транспаранта пятно на голограмме в пространственно- частотной плоскости должна напоминать оптическое пятно на диффузоре.

7. Разработана математическая модель автоматизированного способа записи мультиплексированных спекл голограмм с дискретной разверткой опорного пучка вокруг предметного пучка по образующей конуса траектории, при этом для каждой развертки опорный пучок обладает различным случайным фазовым распределением.

Теоретически полученное выражение комплексной амплитуды восстановленного изображения в выходной плоскости для первой голограммы означает, что комплексная амплитуда восстановленного изображения в

выходной плоскости представляет собой свертку функции комплексно – спеклового пропускания транспаранта с корреляционной функцией опорной и восстанавливающей волн. При этом получаем неискаженное изображение выходного транспаранта, если корреляционная функция опорной и восстанавливающей волн представляет собой δ - функцию. Это достигается, когда опорные и восстанавливающие волны абсолютно идентичны, что определяет селективности записанных голограмм.

8. Автоматизированном способе восстановления голограммы получен формула комплексной амплитуды восстановленного изображения с учетом действия диффузора, что при постоянной интенсивности излучения в плоскости диффузора с увеличением освещаемой площадью “S” диффузора линейно возрастает величина комплексной амплитуды восстановленного изображения и площадь фона вокруг изображения в выходной плоскости.

9. В автоматизированном способе записи для определения селективности записанных голограмм рассмотрен восстановление первой голограммы при считывании второй голограммы. Из полученного выражения комплексной амплитуды первой голограммы следует что восстановление первой голограммы при считывании второй голограммы. не будет.

10. Экспериментальным путем: а) определена оптимальная плотность энергии экспонирования для фотополимеризующихся носителей схема записи Фурье- голограмм спекл-полем, оно составляет от 30 до 40 мДж/см². В результате экспериментальных исследований обнаружили, что при предварительной засветке регистрирующего слоя опорным пучком, происходит существенное увеличение дифракционной эффективности записанных голограмм.

б) определено оптимальное отношение опорной и предметной волн, оно лежит в диапазоне от 2,5 до 3, и позволяет достигать максимальное значения отношение сигнал/шум (от 60 до 70).

в) доказано, что восстановление первой голограммы при считывании второй голограммы не происходит, что подтверждает хорошую селективность предложенной схемы.

11. Предложена структурная схема автоматизированного способа записи и считывания голограмм в реальном масштабе времени с возможностью контроля качества голограммы.

12. Предложенная автоматизированная система управления технологическими процессами и производством голографических изделий, позволяет производить запись и считывание информации с возможностью контроля качества голограммы в реальном масштабе времени, а также гибкое управление этих процессов по заданной программе от персонального компьютера.

13. Разработанный автоматизированный способ может применяться для управления процессами записи и считывания различного рода голографической информации на регистрирующих средах любого типа, при этом автоматизированный способ очень гибкое и обладает высокой надежностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Токонов А.Т. Сравнительный анализ способов записи Фурье-голограмм[текст]/ А.Т. Токонов, Н.М., Аспердиева // Известия КГТУ им И. Раззакова, №1(49), Бишкек 2019. – С.200-205
2. Сагымбаев А.А., Акказиев И.А., Токонов А.Т., Аданбаев А.М. Особенности записи спекл-голограмм при сенсibilизации регистрирующей среды// Проблемы управления и информатики. Доклады международной конференции. Бишкек, 2000.- С. 213-217.
3. Жумалиев К.М., Сагымбаев А.А., Акказиев И.А., Токонов А.Т. 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.
4. Жумалиев К.М., Сагымбаев А.А., Аттокуров У.Т., Сайдаматов Ш.М., / Фотооптические свойства светочувствительного материала HRF-700-20 / Материалы IV научной конференции КРСУ, Бишкек, 1997.
5. Акаев А.А., Майоров С.А. Когерентные оптические вычислительные машины. -Л. Машиностроение, 1977
6. Сидорович В. Г. // ЖТФ. 1976. Т. 46. С. 1306.
7. Burckhardt C.B. Use of a random phase mask for the recording of Foulter transtform holograms of data mask.-“App. opt.”, 1970, V.9, №3, P.695-699.
8. Сагымбаев А.А., Аттокуров У.Т., Сайдаматов Ш.М., Эсенбаева Д.К., / Многократная запись голограмм в фотополимеризующейся среде OMNI DEX 352 / Материалы IV научной конференции КРСУ, Бишкек, 1997.
9. Токонов А.Т. Автоматизированный способ записи Фурье-голограмм с использованием пространственно-модулированных световых волн[текст]/

- А.Т. Токонов Б.Т., Каримов Н.М., Аспердиева / / Известия КГТУ им И. Раззакова, №4, Бишкек 2018. -С.176-186
- 10.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.
- 11.Акаев А.А., Алымкулов С.А., Жумалиев К.М., Кутанов А.А., Нуркамилов А., / Универсальное устройство управления процессом записи голограмм на фототермопластические носители голографические методы хранения, преобразования и обработки информации, Фрунзе 1983.
- 12.Хохлов Р. В. //Ibidem. С. 1116.
- 13.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.
- 14.Токонов А.Т., / Разработка автоматизированного способа измерения информационных характеристик Фурье-голограмм спекл-полем. Токонов А.Т., / Бримкулов У.Н., Аспердиева Н.М., / Известия КГТУ им И. Раззакова, №2 (50) часть 1, 2019, Бишкек. – С.-148-157
- 15.Акаев А.А., Жумалиев К.М., Сагымбаев А.А., Аттокуров У.Т., / Динамика образования голограмм в фотополимеризующейся среде / Оптический журнал, №4, 1998, ГОИ, С-Петербург.
16. Бломберген Н. // Нелинейная спектроскопия. - М.: Мир, 1979. - С. 24.
- 17.Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1973.
- 18.Жумалиев К.М., Джаманкызов Н.К., Сагымбаев А.А., / Особенности регистрации голограмм в фотополимеризующейся среде OMNI DEX 352/ Квантовая электроника, 1996, №2.
- 19.Токонов А.Т., Бримкулов У. Н., / Разработка автоматизированного способа записи мультиплексированных спекл-голограмм. / ЕВРАЗИЙСКИЙ СОЮЗ

УЧЕНЫХ (ЕСУ), Ежемесячный научный журнал № 5 (62) / 2019 1 часть 73
сстр. Москва.

- 20.Духовный А. М., Стаселько Д. И. // Письма ЖТФ. 1982. Т. 8. С. 1009.
- 21.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.2002-210.
- 22.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.
- 23.Чураев А. Л., Стаселько Д. И., Бенкен А. А. // ЖТФ. 1984. Т. 54.С. 306.
- 24.Полянский В.К., Ковальский Л. В. // Опт. и спектр. 1973. Т. 35. С. 345.
Полянский В.К., Полянский В. П. // Фундаментальные основы оптической памяти и среды. - Киев: Вища школа, 1985. - С. 22. Полянский В.К., Рослянов С. Н., Трановецкий В. В. // УФЖ. 1980. Т. 25. С. 645.
- 25.Токонов А.Т., Разработка цифрового блока для способа автоматизированной записи восстановления Фурье-голограмм спекл-полем. [текст]/ Токонов А.Т., Аспердиева Н.М., // научный и информационный журнал МУИТ, №2, 2019(11), Бишкек. 2019-С.40-43
- 26.Денисюк Ю. Н. // Опт. спек. 1963. Т. 15. С. 522.
- 27.Сандер Е. А., Суханов В. И., Шойдин С. А. // Оптическая голография. - Л.: Наука, 183. - С. 77.
- 28.Сидорович В.Г.// Физические основы голографии: (Материалы X Всесоюзной школы по голографии. - Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1978. С. 46).

- 29.Акаев А.А., Жумалиев К.М., Гуревич Б.С. Гуревич С.Б. Оптическое изображение: передача, обработка, хранение. Бишкек -1999 г. 381 с.
- 30.Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С., Цифровая голография – М., Наука 1982 – 296 с.
- 31.Гудмен Дж. Введение в фурье - оптику. - М.: Мир, 1970.
- 32.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.
- 33.Шаршеналиев Ж.Ш., Батырканов Ж.И. Синтез систем управления с заданными показателями качества. Бишкек.: Илим, 1991. с.174.
- 34.Токонов А.Т / Разработка автоматизированной системы управление в голографических установках. [текст] /., Токонов А.Т Бримкулов У.Н., Акиналы кызы Сабина / НАЦИОНАЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ УЧЕНЫХ (НАУ), Ежемесячный научный журнал № 46 / 2019 1 часть 43 стр. г. Екатеринбург. 2019 -с/ 31-35
- 35.Ландау Л. Д. Лифшиц Е. М. Теория поля. - М.: Наука, 1973
- 36.Власов Н. Г., Пресняков Ю. П. // Оптическая голография. - Л.: ЛДНТП, 1972. - С. 51.
- 37.Токонов А.Т. Автоматизация и управление технологическими процессами в голографических установок// 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. 327-332.
- 38.Акаев А.А., Жумалиев К.М., Сагымбаев А.А./ Голографическое само усиление фазовых голограмм в фотополимеризующейся среде OMNI DEX 352 / Наука и новые технологии, Бишкек, №1, 1997.

39. Жумалиев К.М., Сагымбаев А.А. Аттокуров У.Т., / Особенности регистрации наложенных голограмм в фотополимеризующейся среде OMNI DEX 352 / Наука и новые технологии, Бишкек, №1, 1997.
40. Акаев А.А., Жумалиев К.М., Алымкулов С.А. / Регистрация информации на ленточном фототермопластическом носителе/ II-Всесоюзная конференция “Методы оптической обработки информации” Бишкек ., 1992.
41. Сандер Е. А., Шойдин С. А. // Сборник трудов IV Всесоюзной конференции по голографии. - Ереван: ВНИИРИ, 1982. - С. 172.
42. Токонов А.Т., / Разработка автоматизированного способа исследование селективности спекл-голограмм записанных спекловыми опорными волнами. / ЕВРАЗИЙСКИЙ СОЮЗ УЧЕНЫХ (ЕСУ), Ежемесячный научный журнал № 7 (64) / 2019 6 часть 58 стр. Москва.
43. Суханов В. И., Корзинин Ю. Л. // Письма ЖТФ. 1982. Т. 8. С1144.
44. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. - М.: Наука, 1981.
45. Токонов А.Т, Разработка автоматизированного способа восстановления мультиплексированных спекл-голограмм. [текст] / Токонов А.Т. // ЕВРАЗИЙСКИЙ СОЮЗ УЧЕНЫХ (ЕСУ), Ежемесячный научный журнал № 6 (63) / 2019 2 часть 82 стр. Москва. 2019- С. 64-68.
46. Стаселько Д. И., Чураев А. Л. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 324.
47. Сайдаматов Ш.М. // Разработка режимов и устройств голографической памяти на ФПН при различных способах сенсбилизации - автореф. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук. Бишкек, 1999, стр.21.
48. Якубовский С.В., Ниссельсон Л.И., Кулешова В.И. и др. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы Под. Ред. С.В. Якубовского-М: Радио и связь, 1990-496 с.
49. Токонов А.Т. Способ постраничной спекловой записи матрицы мультиплексных голограмм// Наука и новые технологии №4. Бишкек, 2000.- С. 91-93.

50. 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.
51. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.: Мир, 1973.
52. Шило В.Л. Популярныe цифровые микросхемы. Справочник. Москва, "Радио и связь", 1987г.
53. Лошкин В. И., Семенов Г. Б. // Материалы IV всесоюзной школы по голографии. - Л.: ЛФТИ АН СССР, 1973. - С. 313.
54. Акаев А.А., Жумалиев К.М., Сагымбаев А.А., Сайдаматов Ш.М., / Мультиплексирование голограмм в фотополимеризующейся среде OMNI DEX 352 / Труды Международного семинара "Голография и оптическая обработка информации" Бишкек, 1997.
55. Токонов А.Т., Бримкулов У.Н. Спекл-волновой метод записи Фурье-голограммы// Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. Выпуск 136. Украина. Г. Харьков 2004.-С.167-171.
56. Кутанов А.А. // Локальная запись голограмм одновременным методом на фототермопластический диск и его применения в системах оптической обработки информации- автореф. На соиск. Уч. Степ. Доктора техн. Наук. Минск 1992, стр.48.
57. Зельдович Б. Я., Шкунов В. В. а) Препринт ФИАН СССР №57. - Москва, 1978; б) // Физические основы голографии : (Материалы X Всесоюзной школы по голографии. - Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1978. С. 46); в) Appl. Opt. 1979. V. 18. p.3633.
58. Клименко И. С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. - М.: Наука, 1985.
59. Leonard C., Upatniecks J. //J. Opt. Soc. Am. 1971. V.60. P.297.
60. Gabor J. D. //Nature. 1948.V. 161.P. 777.

- 61.Ахманов С. А., Хохолов Р.В. Проблемы нелинейной оптики. - М.: ВИНТИ, 1964.
- 62.Давенпорт В. Б., Рут В. Л. Введение в теорию случайных процессов и шумов. - М.: ИЛ, 1960.
- 63.Лещев А. А., Сидорович В. Г. // Оптическая голография / Под. ред. Ю. Н. Денисюка. - Л.: Наука, 1979. - С. 42.
- 64.Джаманкызов Н.К., Сагымбаев А.А., Эсенбаева Д.К., Аттокуров У.Т./ Моделирование температурных полей нагрева фотополимеризующейся носителей тепловым излучением / Труды Международного семинара “Голография и оптическая обработка информации” Бишкек, 1997.
- 65.Хохлов Р. В. // Радиотехн. и электрон. 1961. Т. 6. С. 917.
- 66.Франсов М. Оптика спеклов. - М.: Мир, 1980.
- 67.Оптическая голография /Пер. с англ. Под ред. Г. Колфилда.- М.: Мир, 1982.
- 68.Островский Ю. И. Голография и ее применение. - Л.: Наука, 1973.
- 69.Зельдович Б. Я., Шкунов В. В. // Физические основы голографии: Труды XV школы по голографии. - Л.: ЛФТИ АН СССР, 1983. - С. 104.
- 70.Зельдович Б. Я., Шкунов В. В. // Квант. электрон. 1984. Т. 11. С. 2162.
- 71.Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта.- М.: Наука, 1985.
- 72.Акаев А.А., Жумалиев К.М., Сагымбаев А.А., Аттокуров У.Т., / Особенности образования голограмм в фотополимеризующейся носителях / Известия НАН КР №1,1998.
- 73.Зельдович Б. Я., Шкунов В. В., Яковлева Т.В. Модовая теория объемных голограмм: Препринт ФИАН СССР №54. - Москва, 1979.
- 74.Кутанов А.А., Абдрисаев Б.Д., Снимщиков И.А./ Система записей микро голограмм на фототермопластический диск при НК - лазерном нагреве / II- Всесоюзная конференция “Методы оптической обработки информации” Бишкек., 1992.

- 75.Зельдович Б. Я., Шкунов В. В., Яковлева Т. В. // Проблемы оптическая голографии / Под. ред. Ю. Н. Денисюка. - Л.: Наука, 1981. - С. 80.
- 76.Gunter P. //Phys. Rept. 1982. V.93. P. 199.
- 77.Борискевич А.А., Даймошенко В.Ф. и др. “Ориентационная избирательность микроголограмм в ГЗУ типа 3Д”. // Тез. докл. V Всесоюзной конф. по голографии (Рига 1985)-Рига: ИФАН ЛатвССР, 1985, Ч.-II.
- 78.Крупницкий Э.И., Барбанель И.С. Оптимизация режима записи тонких амплитудных голограмм методом нелинейного программирования. // ЖНиПФиК., 1973, Т. 18, вып.4, С. 268-273.
- 79.Жумалиев К.М., Сагымбаев А.А., Акказиев И.А., Абакирова Ж.А., Токонов А.Т., Аданбаев А.М. 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.
- 80.Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. - М.: Наука, 1971.
- 81.Leith E.N., Upatnieks J.//J. Opt. Soc. Am. 1963. V. 53. P.1377.
- 82.Laser Speckle and Related Phenomena/Ed. J. C. Dainty. - Berlin;
- 83.Bragg W.L. //Nature. 1950. V. 166. P. 399
- 84.Зельдович Б. Я., Мамаев А. В., Хайкин А. Ю, Шкунов В. В., Яковлева Т. В. // Физические основы и прикладные вопросы голографии. - Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1985. - С. 210.
- 85.Строук Дж. Введение в когерентную оптику и голографию. - М.: Мир, 1967.

Авторский свидетельство

- 86.Свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ №621
Программа автоматизированного способа записи и восстановления Фурье-голограмм спекл-полем. Кыргызская Республика [текст] / А.Т.Токонов.
Бишкек, 2020.- С.1-3

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Акты внедрения

- КГТУ имени И. Раззакова (Кыргызстан, Бишкек)
- ОШТУ имени академика М.М. Адышева (Кыргызстан, Ош)

2. Свидетельства об авторском праве на программу

- Программа автоматизированного способа записи и восстановления Фурье-голограмм спекл-полем

3. Программные коды (модули)



Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

Настоящим подтверждаем, что в ходе выполнения диссертационного исследования на тему: «Разработка автоматизированного способа записи и автоматизированной технологии мультиплексирования Фурье-голограмм спекл-полем» разработан лабораторный стенд по курсу «Обработка опто-электронных сигналов», внедрен в учебный процесс на кафедре «Радиоэлектроника» по специальности 690200 - Радиотехника Института электроники и телекоммуникаций КГТУ им. И. Раззакова.

Директор ИЭТпри КГТУ им. И. Раззакова



Б.Т. Каримов

Зав. кафедрой «Радиоэлектроники»

А.К. Кармышаков



Утверждаю
ректор Ошского технологического
университета имени акад. М.М.Адышева
Абидов А.О.

» _____ 2020 г.

Акт внедрения

результатов диссертационной работы в учебный процесс Токонова Акиналы Тургуналиевича «Разработка автоматизированного способа записи и автоматизированной технологии мультиплексирования Фурье-голограмм спекл-полем» на получение научной степени кандидата технических наук

Комиссия в составе декана факультета Кибернетики и информационной технологии, к.т.н., профессора ОшТУ Сайдаматова Ш. М, заведующего кафедрой «Сети связи и системы телекоммуникации» к.т.н., доцент Мойдунова Т. Т., к.т.н., доцента Сопубекова Н.А., составили настоящий акт, о том что результаты диссертационного исследования Токонова Акиналы Тургуналиевича на тему: «Разработка автоматизированного способа записи и автоматизированной технологии мультиплексирования Фурье-голограмм спекл-полем» внедрен в учебный процесс на кафедре «Сети связи и системы телекоммуникации» по предмету «Оптические телекоммуникационные системы» по направлению 690300-Инфокоммуникационные технологии и системы связи ОшТУ им. М.М. Адышева.

№п/п	Название работы	Вид проведения
1	Автоматизированный способ записи Фурье-голограмм спекл-полем	Лекция
2	Исследование узлов автоматизированного способа записи Фурье-голограмм спекл-полем	Лабораторная работа

Декан ФКИТ, к.т.н.,
профессор ОшТУ
к.т.н., доцент.

Ш.М.Сайдаматов

Заведующий кафедрой
к.т.н., доцент
кафедры «ССиСТ»
к.т.н., доцент

Т. Т. Мойдунов

Доцент «кафедры ССиСТ»

Н.А.Сопубеков

КЫРГЫЗСКАЯ РЕСПУБЛИКА



КЫРГЫЗПАТЕНТ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации
программы для ЭВМ

№ 621

Название программы для ЭВМ:

*Программа автоматизированного способа записи и восстановления
Фурье-голограмм спекл-полем*

Автор (ы), гражданство:

*Токонов Акиналы Тургуналиевич,
Кыргызская Республика*

Правообладатель (и), страна:

*Токонов Акиналы Тургуналиевич,
Кыргызская Республика*

Дата первого опубликования

программы: *28.03.2019 г., Кыргызская Республика*

Заявка № *20200019.6*

Зарегистрировано в Государственном реестре программ для ЭВМ
Кыргызской Республики: *24 июня 2020 года*



КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫ



КЫРГЫЗПАТЕНТ

ЭЭМ үчүн программаны
мамлекеттик каттоо жөнүндө

КУБӨЛҮК

№ 621

ЭЭМ үчүн программанын аталышы:

*Фурье-голограммаларды спектр-талаа менен жазуунун жана
калыбына келтирүүнүн автоматташтырылган ыкмасынын программасы*

Автору (авторлору), граждандыгы:

*Төкөнов Акиналы Тургуналиевич,
Кыргыз Республикасы*

Укук ээси (ээлери), өлкөсү:

*Төкөнов Акиналы Тургуналиевич,
Кыргыз Республикасы*

Программанын алгачкы

жарыяланган күнү, орду: 28.03.2019 -ж., Кыргыз Республикасы

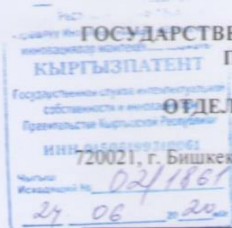
Өтүнмөнүн № 20200019.6

Кыргыз Республикасынын ЭЭМ үчүн программаларынын мамлекеттик
катталган: 2020-жылдын 24 -июнунда



Төрайым

Д. Молдошева



720021, г. Бишкек, ул. Московская, 62

Отдел регистрации и распределения АВ: 68-00-86

Общий отдел: 68-16-98

Факс: 68-19-74

Наш № 624 от 15.06.2020 г.

Адрес: г. Бишкек, ул. Ай, д.4

Токонову Акиналы Тургуналиевичу

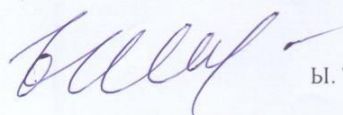
Тел.: 0775 987707

Р Е Ш Е Н И Е
об официальной регистрации программы для ЭВМ

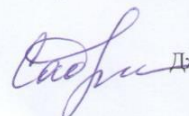
Входящий № заявки:	20200019.6
Дата поступления заявки:	15 июня 2020 года
Автор:	Төкөнов Акиналы Тургуналиевич
Обладатель имущественных прав:	Төкөнов Акиналы Тургуналиевич
Страна:	Кыргызская Республика
Название программы для ЭВМ:	Программа автоматизированного способа записи и восстановления Фурье-голограмм спекл-полем
Дата и место первого выпуска в свет (опубликования) программы для ЭВМ:	28.03.2019 г., Кыргызская Республика

В результате рассмотрения заявки установлено соответствие заявленного программного продукта условиям правовой охраны программы для ЭВМ, определенным частями 1-4 статьи 3 Закона Кыргызской Республики «О правовой охране программ для электронных вычислительных машин и баз данных» и вынесено решение об официальной регистрации данной программы для ЭВМ

Начальник управления
авторского и смежных прав

 Б. Турсуналиева

Гл. спец. отдела регистрации
и распределения авторского вознаграждения

 Дж. Садыкова

Программные коды

```
program GUniver;
uses
  Forms,
  Unit1 in 'Unit1.pas' {Form1 };
{$R *.RES}
begin
  Application.Initialize;
  Application.CreateForm(TForm1, Form1);
  Application.Run;
end.
unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  Menus, StdCtrls, ExtCtrls, ComCtrls, ImgList;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Memo1: TMemo;
    Label1: TLabel;
    PopupMenu1: TPopupMenu;
    Button1: TButton;
    N11: TMenuItem;
    N21: TMenuItem;
    N31: TMenuItem;
    N41: TMenuItem;
    N51: TMenuItem;
    N1: TMenuItem;
    N2: TMenuItem;
    N3: TMenuItem;
    N4: TMenuItem;
    N5: TMenuItem;
```

```

N6: TMenuItem;
N7: TMenuItem;
OutRes: TMemo;
Animate1: TAnimate;
ImageList1: TImageList;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure N51Click(Sender: TObject);
procedure N1Click(Sender: TObject);
procedure Button1Exit(Sender: TObject);
procedure N2Click(Sender: TObject);
procedure N21Click(Sender: TObject);
procedure N3Click(Sender: TObject);
procedure N4Click(Sender: TObject);
procedure N5Click(Sender: TObject);
procedure N6Click(Sender: TObject);
procedure N7Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form1: TForm1;

implementation

{$R *.DFM}

procedure HitroAdd(st:string);
var
    i:integer;
begin

```

```

Form1.OutRes.Lines.Add("");
for i:=1 to length(st) do
Form1.OutRes.Text:=Form1.OutRes.Text+st[i];
Form1.OutRes.Refresh;
end;

procedure InProcess(l:boolean);
var
    ms,i:byte;
begin
    if l then ms:=15 else ms:=5;
    for i:=1 to ms do begin
        Form1.OutRes.Text:=Form1.OutRes.Text+'.';
        Form1.OutRes.Refresh;
        sleep(150);
    end;
    Form1.OutRes.Lines.Text:=Form1.OutRes.Lines.Text+'OK';
end;

```

```

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    OutRes.Visible:=false;
    OutRes.Clear;
    PopupMenu1.Popup(Form1.Left+Button1.Left+Button1.Width+3,Form1.Top+Button1.Top+23);
end;

```

```

procedure TForm1.N51Click(Sender: TObject);
begin
    Application.Terminate;
end;

```

```

procedure TForm1.N1Click(Sender: TObject);
begin

```



```

Animate1.Active:=true;
Animate1.Visible:=true;
OutRes.Clear;
OutRes.Lines.Add('<<< - Режим записи с предварительной засветкой - >>>');
OutRes.Visible:=true;
HitroAdd('Установка светоделиителя "2"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка прерывателя "5"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка диффузора с диаграммой "3"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка линзы "6"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка прозрачного "7"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка линзы "8"');
InProcess(false);
HitroAdd('Включение питания лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Идет засветка');
InProcess(true);
HitroAdd('Прерыватель "5" в пассивное положение');
InProcess(false);
HitroAdd('Идет экспонирование');
InProcess(true);
HitroAdd('Выключение лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Голограмма записана.');
```

```

procedure TForm1.Button1Exit(Sender: TObject);
```

```

begin
if Button1.CanFocus then
    Button1.SetFocus;
end;

procedure TForm1.N2Click(Sender: TObject);
begin
Animate1.Active:=true;
Animate1.Visible:=true;
OutRes.Clear;
OutRes.Lines.Add('<<< - Режим записи без предварительной засветки - >>>');
OutRes.Visible:=true;
HitroAdd('Установка светоделиителя "2"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка диффузора с диаграммой "3"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка линзы "6"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка прозрачного "7"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка линзы "8"');
InProcess(false);
HitroAdd('Включение питания лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Идет экспонирование');
InProcess(true);
HitroAdd('Выключение лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Голограмма записана. ');
Animate1.Active:=false;
Animate1.Visible:=false;
end;

```

```

procedure TForm1.N21Click(Sender: TObject);
begin
  Animate1.Active:=true;
  Animate1.Visible:=true;
  OutRes.Clear;
  OutRes.Lines.Add('<<< - Режим восстановления голограммы - >>>');
  OutRes.Visible:=true;
  HitroAdd('Установка светодетектора "2"');
  InProcess(false);
  HitroAdd('Установка прерывателя "5"');
  InProcess(false);
  HitroAdd('Включение питания лазера');
  InProcess(false);
  HitroAdd('Идет восстановление...');
  InProcess(true);
  HitroAdd('Выключение лазера');
  InProcess(false);
  HitroAdd('Прерыватель "5" в пассивное положение');
  InProcess(false);
  HitroAdd('Восстановление голограммы завершено.');
```

```

procedure TForm1.N3Click(Sender: TObject);
begin
  Animate1.Active:=true;
  Animate1.Visible:=true;
  OutRes.Clear;
  OutRes.Lines.Add('<<< - Режим измерения энергии экспонирования - >>>');
  OutRes.Visible:=true;
  HitroAdd('Установка светодетектора "2"');
  InProcess(false);
```



```

HitroAdd('Установка диффузора с диаграммой "3");
InProcess(false);
HitroAdd('Установка линзы "6");
InProcess(false);
HitroAdd('Установка прозрачного "7");
InProcess(false);
HitroAdd('Установка линзы "8");
InProcess(false);
HitroAdd('Включение питания лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка фотодиода "9");
InProcess(false);
HitroAdd('Установка фотодиода "10");
InProcess(false);
HitroAdd('Идет измерение');
InProcess(true);
OutRes.Lines.Add('> I1=FF;');
OutRes.Lines.Add('> I2=FF;');
OutRes.Lines.Add('[возможно питание прибора выключено]');
HitroAdd('Выключение лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Измерение закончено. ');
Animate1.Active:=false;
Animate1.Visible:=false;
end;

procedure TForm1.N4Click(Sender: TObject);
begin
Animate1.Active:=true;
Animate1.Visible:=true;
OutRes.Clear;
OutRes.Lines.Add('<<< - Измерение дифракционной эффективности - >>>');
OutRes.Visible:=true;

```

```

HitroAdd('Установка светоделиителя "2"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка прерывателя "5"');
InProcess(false);
HitroAdd('Включение питания лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка фотодиода "9"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка фотодиода "12"');
InProcess(false);
HitroAdd('Идет измерение');
InProcess(true);
OutRes.Lines.Add('> Df1=FF;');
OutRes.Lines.Add('> Df2=FF;');
OutRes.Lines.Add('[возможно питание прибора выключено]');
HitroAdd('Выключение лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Измерение закончено. ');
Animate1.Active:=false;
Animate1.Visible:=false;
end;
procedure TForm1.N5Click(Sender: TObject);
begin
Animate1.Active:=true;
Animate1.Visible:=true;
OutRes.Clear;
OutRes.Lines.Add('<<< - Измерение интенсивности сигнальной волны - >>>');
OutRes.Visible:=true;
HitroAdd('Установка светоделиителя "2"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка прерывателя "5"');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка сигнальной маски "14"');

```

```

InProcess(false);
HitroAdd('Включение питания лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Установка фотодиода "16"');
InProcess(false);
HitroAdd('Идет измерение');
InProcess(true);
OutRes.Lines.Add('> Is=FF');
OutRes.Lines.Add('[возможно питание прибора выключено]');
HitroAdd('Выключение лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Измерение закончено. ');
Animate1.Active:=false;
Animate1.Visible:=false;
end;
procedure TForm1.N6Click(Sender: TObject);
begin
    Animate1.Active:=true;
    Animate1.Visible:=true;
    OutRes.Clear;
    OutRes.Lines.Add('<<< - Измерение интенсивности шума - >>>');
    OutRes.Visible:=true;
    HitroAdd('Установление светодетектора "2"');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Установление прерывателя "5"');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Установка маски "13" для измерения шума');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Включение питания лазера');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Установка фотодиода "16"');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Идет измерение');

```

```

InProcess(true);
OutRes.Lines.Add('> In=FF');
OutRes.Lines.Add('[возможно питание прибора выключено]');
HitroAdd('Выключение лазера');
InProcess(false);
HitroAdd('Измерение закончено. ');
Animate1.Active:=false;
Animate1.Visible:=false;
end;
procedure TForm1.N7Click(Sender: TObject);
begin
    Animate1.Active:=true;
    Animate1.Visible:=true;
    OutRes.Clear;
    OutRes.Lines.Add('<<< - Записать голограмму спекловой опорной волной - >>>');
    OutRes.Visible:=true;
    HitroAdd('Установка диффузора с диаграммой "3"');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Установка линзы "6"');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Установка маски с окошком "4"');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Установка прозрачного "7"');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Установка линзы "8"');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Включение питания лазера');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Идет запись');
    InProcess(true);
    HitroAdd('Выключение лазера');
    InProcess(false);
    HitroAdd('Голограмма записана. ');

```

```
Animate1.Active:=false;  
Animate1.Visible:=false;  
end;  
end.
```