

2008-482

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

На правах рукописи

УДК 728.38: 621.397

МАКАРОВ КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ

Разработка скоростного лазерного устройства
записи и исследование процесса записи дифракционных элементов
излучением УФ-лазера на слоях a-Si

Специальность: 01.04.05 - Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Бишкек 2008

Работа выполнена в лаборатории лазерных технологий Института физики Национальной академии наук Кыргызской Республики

Научный руководитель: академик, доктор технических наук, профессор

Кутанов Аскар Асанбекович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор

Марипов Арапбай Марипович

доктор технических наук, профессор

Коронкевич Вальдемар Петрович

Ведущая организация: Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина, г. Бишкек

Защита состоится «12» декабря 2008 года в 16 часов на заседании Межведомственного диссертационного совета Д 01.07.342 по присуждению ученых степеней доктора и кандидата наук при Институте физики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Иссык-Кульском государственном университете им. К.Тыныстанова и Ошском государственном университете по адресу: 720071, г. Бишкек, проспект Чуй, 265а.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Национальной академии наук Кыргызской Республики

Автореферат разослан «11» ноября 2008 г.

**Ученый секретарь
Межведомственного**

диссертационного совета, к.ф.-м.н *Мерен* **Меренкова Л.К.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. В Кыргызской Республике принята Стратегия Развития Страны на среднесрочный период, направленная на устойчивое развитие и сокращение бедности. Либерализация экономики, свободная конкуренция, появление новых частных компаний и сокращение Госконтроля при производстве некоторых типов пищевых продуктов повышают вероятность подделок. Много частных компаний заинтересовано любыми путями произвести или импортировать из-за рубежа продовольственные и промышленные товары с низким качеством. Поэтому идентификация и свидетельства о товарах очень необходимы в нашей стране, особенно при импорте товаров, производстве пищевых продуктов, что важно для охраны здоровья людей. Подделка денежных банкнот – угроза для экономической безопасности государства.

Современные высокие технологии изготовления голограммы со специальными эффектами поднимают барьеры подделке документов и продуктов. Голографические оптические элементы обладают неоспоримыми преимуществами для маркировки товаров и защиты от подделок:

- высокая дифракционная эффективность,
- простота визуального восприятия и привлекательность,
- невозможность копирования на копируемых аппаратах,
- легкость, простота тиражирования и низкая стоимость.

В настоящее время ежегодный рост мирового голографического рынка составляет около 30%. Этот рост стимулируется внедрением новых технологий, которые увеличивают производительность и существенно улучшают качество голограмм. Снижение стоимости тиражирования и точность воспроизведения определяются технологией изготовления.

В связи с этим разработка новых устройств, способных снизить стоимость получаемых голограмм и улучшить ее защитные характеристики, является **актуальной**.

Целью данной работы является создание высокоскоростной системы записи дифракционных оптических элементов и исследование процесса записи дифракционных элементов.

Для достижения поставленной цели необходимо было **решить следующие задачи:**

1. Разработать высокоскоростную установку записи дифракционных элементов.
2. Провести эксперименты по отработке технологии создания оптических дифракционных элементов на подложках аморфного кремния.

3. Исследовать морфологические и структурные изменения в пленках аморфного кремния при лазерном облучении.

Достоверность полученных результатов должным образом обеспечена использованием комплекса апробированных приборов и методов измерения; согласием результатов измерений независимыми методами и статистической обработкой полученных результатов.

Научная и практическая новизна работы.

1. Предложено, разработано и экспериментально исследовано оптико-электронное устройство для изготовления дифракционных оптических элементов (ДОЭ) – высокоскоростная лазерная записывающая система с плоским сканированием, позволившая использовать безрезистивный способ записи с пространственным разрешением до 2000 мм^{-1} и погрешностью выполнения топологии дифракционной структуры менее 50 нм при общем размере элементов до 300 мм.

2. Предложен и исследован метод записи дифракционных микроструктур в тонких пленках аморфного кремния (ширина линии до 0,3-0,5 мкм). Запись осуществляется движущимся сфокусированным лазерным пучком в диапазоне скоростей от 10^{-2} до $5 \cdot 10^3$ мм/с. Под действием лазерного излучения термохимические и структурные процессы происходят по всей толщине пленки аморфного кремния, а сопровождающие их изменения оптических характеристик пленки можно использовать для контроля записи.

Практическая ценность работы.

Разработанный метод и оборудование дают возможность проводить запись дифракционных оптических элементов с высокой скоростью (от 10^{-2} до $5 \cdot 10^3$ мм/с) и дифракционной эффективностью $\sim 28\%$.

На защиту выносятся.

1. Установка для высокоскоростной записи оптических дифракционных элементов на подложках аморфного кремния.

2. Метод записи дифракционных микроструктур (период линий до 0,3-0,5 мкм) в тонких пленках аморфного кремния излучением УФ-лазера с чувствительностью регистрации ($\sim 25 \text{ мДж/см}^2$), позволяющий проводить запись дифракционных элементов с высокой скоростью (от 10^{-2} до $5 \cdot 10^3$ мм/с) и дифракционной эффективностью ($\sim 28\%$).

3. Выявленные морфологические и структурные изменения в пленках аморфного кремния, приводящие к созданию наноразмерных дифракционных элементов под действием УФ лазерного излучения.

Личный вклад автора. Диссертация является обобщением исследований по созданию метода и устройства для высокоскоростной записи дифракционных элементов, выполненных автором в Институте фи-

зики НАН КР с 2001 г. по 2008г.. Практическая реализация ДОЭ выполнялась автором на лазерной записывающей системе, созданной в Институте физики НАН КР в лаборатории «Лазерных технологий» при поддержке Научной программы НАТО в рамках проекта «Наука ради мира». Личный вклад автора заключается в постановке, обосновании и решении задач, приведенных в диссертационной работе, непосредственном участии в изготовлении установки для записи, а также в выполнении и организации экспериментов.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы докладывались на: Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика 2003», октябрь, Санкт-Петербург; на III Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» ФПО-2004, (18 - 21 октября 2004 г., Санкт-Петербург); Международной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (ФТТ-2005), Минск, Беларусь; Республиканской конференции молодых ученых г.Бишкек, Киргизия; на международной конференции «Diffractive optics 2005» Warsaw, Poland, Sep.2005; четвертой Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» 2-5 октября 2007 г. Санкт-Петербург, Россия.

Публикации. По теме диссертации соискателем лично и в соавторстве опубликовано 8 печатных работ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 100 страниц текста, 38 рисунков, 2 таблицы и 67 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении раскрыта актуальность темы, сформулирована цель работы, достоверность полученных результатов, показана научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора.

В первой главе содержится обзор и анализ литературных данных по теме диссертации. Приведен анализ работ по синтезу дифракционных оптических элементов и методам прямой лазерной записи дифракционных микроструктур. Подробно описан термохимический метод изготовления ДОЭ в пленках хрома и дана модель процесса термохимической записи. В этой главе также описаны методы автоматической фокусировки в лазерных записывающих устройствах и методы определения специфических ошибок лазерных записывающих систем. В итоге было показано, что известные в настоящее время методы синтеза

микроструктур не позволяют наносить с высокой точностью и большой скоростью фазовый рельеф с пространственными частотами до 2000 мм^{-1} на подложку размером $100 \times 300 \text{ мм}$. Это является препятствием на пути широкого практического применения дифракционной оптики. Кроме того, двухступенчатый процесс формирования рисунка (сначала в резисте, а затем в хrome) вносит дополнительные погрешности. Перенос изображения из резиста в подложку сопровождается изотропными искажениями. Вследствие этого уход размеров элементов структуры фотошаблона шириной 1.5 мкм в обычной резистивной литографии составляет $0,3\text{-}1 \text{ мкм}$. Очевидно, что прямое изготовление рисунка фотошаблона в тонких пленках хрома или любого другого поглощающего вещества существенно упрощает процесс изготовления фотошаблона и увеличивает его точность, а применение для записи фотошаблонов сфокусированного до субмикронных размеров мощного лазерного излучения и прецизионного контроля его мощности позволит решить эту проблему.

Во второй главе описана разработка методов получения мастер-голограмм, материал и методы исследования получаемых дифракционных элементов.

Оптические элементы, полученные от рельефа поверхности горячим тиснением, дают радужные голограммы для защиты и записи информации. Такие элементы обычно имеют микроструктурный рельеф с периодичностью в 1 мкм и глубиной до $0,15 \text{ мкм}$. При компьютерном получении голограммы обычно используется фоторезистивный метод, развитый для микроэлектроники. Образец записывается экспозицией тонкого слоя фоторезиста, нанесенного на стеклянную подложку. После проявления фоторезистивной картины изображение переносится на пленку-маску, обычно хром. Образец хрома может использоваться непосредственно как двойная амплитудная голограмма или как маска для реплицирования элементов. Эти методы работают весьма хорошо в полупроводниковой индустрии, где подложки являются номинально плоскими, толщиной несколько миллиметров и в сечении менее $150\text{-}200 \text{ мм}$. Однако, множество специальных голограмм получено на толстых высококачественных основаниях, которые являются очень неудобными для покрытия однородного и тонкого слоя фоторезиста. Ограничения, типичные для фоторезистивной технологии, можно исключить при использовании альтернативной технологии, разработанной нами. Эта технология основана на тепловом действии лазерного луча на подложку.

В ряде работ показано, что нагревание лазерным пучком вызывает кристаллизацию в тонких пленках $\alpha\text{-Si}$. Также было установлено, что на пленках $\alpha\text{-Si}$ можно записывать непрерывный рельеф с высоким

пространственным разрешением, а также вспомогательные структуры могут быть непосредственно сформированы на пленках $\alpha\text{-Si}$.

Для проведения исследований и получения дифракционных элементов были получены аморфные пленки кремния и хрома термическим и магнетронным распылением. Наиболее оптимальными, согласно проведенным исследованиям, оказались аморфные пленки кремния толщиной $0,35 \text{ мкм}$, полученные магнетронным распылением. Запись дифракционных элементов производилась на разработанном нами двухкоординатном записывающем устройстве. Контроль за получением дифракционных элементов, записываемых на разработанном устройстве, осуществляли с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов, оптического интерферометра и профилометра.

Для получения чистых и однородных покрытий проводили термическое напыление в глубоком вакууме (10^{-3} Па) при наличии азотной ловушки для вымораживания остаточных газов во избежание загрязнения напыляемого слоя.

Обработку технологии и режимов напыления кремния вначале проводили в вакуумной установке на основе универсального вакуумного поста ВУП-5. В качестве испарителя использовалась вольфрамовая спираль. Как показали проведенные исследования по оптимизации напыления, наиболее приемлемым размером вольфрамовой проволоки является диаметр $1,2 \div 1,5 \text{ мм}$ с общей длиной 100 мм .

При соблюдении всех вышеперечисленных тонкостей напыления получались однородные чистые пленки кремния толщиной до одного микрона. Однородность структуры и чистота получаемых пленок была подтверждена исследованием их структуры и морфологии поверхности с помощью рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии.

Вакуумно-термическое распыление позволяет производить напыление любых материалов с большой скоростью. Однако, если производится напыление больших площадей (более 25 см^2), возникает неоднородность по толщине напыляемого слоя, которую можно ликвидировать перемещением образца или перемещением напылителя. Эти операции очень сложно осуществлять при термическом напылении. Преодолеть эту трудность смогли с помощью магнетронного распыления.

Действие магнетронного распылителя основано на распылении материала мишени-катода при его бомбардировке ионами рабочего газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда. Возникающая при этом вторичная электронная эмиссия поддерживает разряд и обуславливает распыление материала мишени – катода.

Преимуществом магнетронного распыления является высокая скорость нанесения пленки и точность воспроизведения состава распыляемого материала.

В данной работе использовались следующие рабочие характеристики: напряжение и сила тока разряда, удельная мощность на катоде, давление рабочего газа и магнитная индукция. В качестве рабочего газа использовали аргон (10^{-2} Па) при напряжении разряда 1000 В. В этих условиях плотность тока составляла 2×10^3 А/м², поверхностная плотность энергии 10^6 Вт/м², магнитная индукция 0,1 Тл на расстоянии 5 см от катода.

Скорость конденсации при магнетронном распылении зависела от силы тока разряда и давления рабочего газа. Для обеспечения воспроизводимости и стабильности процесса силу тока разряда поддерживали с точностью $\pm 2\%$.

В нашем случае использовали планарную распылительную систему. Подложку транспортировали через зону плазмы. Для снижения температуры подложки при магнетронном распылении, последнюю помещали на охлаждаемый барабан, изготовленный из металла.

Система транспортирования подложки в рабочем объеме позволила получить равнотолщинное напыление, а как показал структурный анализ, пленки состоят из чистого кремния и, в зависимости от скорости напыления, имеют кристаллическую, аморфную или смешанную структуру. Следует отметить, что при получении аморфной структуры получается лучшая адгезия пленки и подложки. При этом подложка меньше подвержена термическому воздействию за счет большой скорости осаждения и соответствующего перемещения барабана.

Все исследования по изменению рельефа поверхности пленок кремния под действием лазерного облучения первоначально проводили на оптическом микроскопе Микро 201-01. После отбора образцов окончательный просмотр и химический анализ (поэлементный) поверхности осуществляли на сканирующих электронных микроскопах BS - 301 и JSM-6700.

Для исследования в сканирующем микроскопе на готовые образцы напылялся слой золота для создания проводящего слоя. При выводе результатов химического анализа пики золота не воспроизводились (удалялись). Микроскоп JSM-6700 позволяет проводить исследования не только морфологии, но и поэлементный химический анализ вещества. Все данные по исследованию выводились на экран монитора и фиксировались в электронном варианте. Разрешение микроскопа составляло 1 нм. Увеличение можно было доводить до 1 000 000 крат.

Для регистрации микроstructures была использована установка «Профилометр АИМ», которая представляет собой программно-

аппаратный измерительный комплекс, предназначенный для измерения параметров микроstructures ОДЭ. В состав установки входят следующие элементы:

- микроинтерферометр МИИ-4М (ЛОМО);
- перемещаемое зеркало с контроллером;
- высокоразрешающая камера и плата ввода изображения;
- лазерный источник освещения со световодом;
- двухкоординатный предметный столик с блоком управления;
- персональная электронно-вычислительная машина с программным обеспечением.

В основе принципа действия установки для регистрации микроstructures ОДЭ заложена реализация алгоритма фазовых шагов. Этот алгоритм позволяет измерять параметры микро рельефа исследуемой поверхности путем расшифровки интерферограмм, полученных от этой поверхности для различной разности хода опорного и предметного пучков. Результаты обработки представляются в виде полутоновых изображений, изображений в псевдоцветах, 3-мерных графиков, изолиний, гистограмм, графиков горизонтальных и вертикальных сечений, числовых таблиц. Результаты всех этих видов можно получить в виде рсх-файлов с последующей распечаткой на принтере.

Съемку дифрактограмм проводили на установке «Дрон - 2» в CuK_α - излучении, скорость сканирования $1^\circ/\text{мин}$. Для определения вещества каждой фазы многофазной системы определяли межплоскостные расстояния. По картотеке ASTM с использованием данных таблицы определяли вещество соответствующей фазы.

Для получения дифракционных элементов на пленках аморфного кремния и хрома применялся твердотельный лазер LCS-DTL-374QT, имеющий следующие характеристики:

- | | |
|--|---------------|
| - длина волны излучения | 355 нм, |
| - энергия в импульсе на 1 кГц, не менее | 20 мкДж, |
| - максимальная средняя выходная мощность, не менее | 30 мВт, |
| - диапазон частоты повторения импульсов | 0,5 – 10 кГц, |
| - поляризация линейная и вертикальная | 100:1. |

Определено влияние погрешностей изготовления дифракционной структуры на характеристики волнового фронта. Дифракционные элементы, предназначенные для преобразования волновых фронтов, обычно состоят из системы зон, нарисованных или вытравленных в материале подложки. Эти структуры представляют собой дифракционные решетки, использующие вариации шага решетки для управления распределением дифрагированного света. Ошибки записанной структуры решетки и формы подложки вносят вклад в ошибку воспроизве-

дения дифрагированного волнового фронта. Ошибки в изготовленном ДОЭ могут быть разделены на два основных типа:

- ошибки конфигурации подложки;
- ошибки записи.

Ошибки записи решетки могут быть далее разделены на:

- ошибки расположения зон;
- ошибки скважности;
- ошибки глубины травления зон (в случае фазового элемента).

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что применение комплекса фундаментальных методов исследования позволяет с большой достоверностью и однозначно судить о происходящих процессах при создании дифракционных элементов, его структурных и морфологических изменениях в зависимости от энергии импульса, его продолжительности и частоты.

В третьей главе отражены результаты разработки сканирующей лазерной системы для высокоскоростной записи оптических дифракционных элементов.

Сканирующая лазерная записывающая система (СЛЗС) для высокоскоростного формирования ОДЭ, разработанная нами, основана на принципе двухлучевой интерференционной картины (рис.1). Этот принцип - стандартный путь получения дифракционной решетки и голограммы.

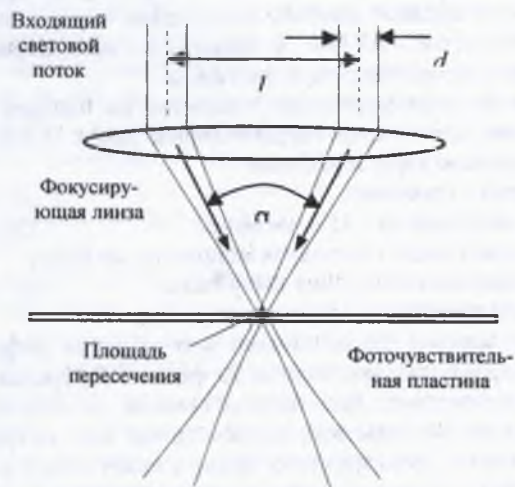


Рис. 1 Формирование решетчатой структуры двумя сфокусированными лучами

Лазерные лучи действуют на фоточувствительную пластину и производят запись структуры решетки. Для получения двух- и трехмерных эффектов цветного изображения необходимо изменять направление и частоту лазерного пучка. Особенности каждой точки поверхности определяют три параметра. Первый параметр - это расстояние между штрихами s (расстояние между осевыми линиями лучей), которое определяется углом α , полученным от пересечения двух когерентных лазерных лучей. Угол пересечения α определяется по формуле

$$\sin(\alpha) = \lambda/s \quad (1)$$

где λ - длина волны лазера. Расстояние l между поступающими лазерными пучками рассчитывается по формуле

$$l = 2 \cdot f \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2), \quad (2)$$

где f - фокусное расстояние объектива.

Вторым параметром является размер дифракционного элемента D , который определяется размером поступающего лазерного пучка d и фокусным расстоянием f фокусирующей линзы:

$$D = 2.44 \lambda \cdot f/d \quad (3)$$

Третий параметр - угол θ ориентации решетки - определяется направлением входящих лазерных пучков. Из (1) и (2) видно, что наибольший угол пересечения α (и соответственно расстояние $l = 2y_0$), соответствует наибольшему параметру s . СЛЗС создает матричную голограмму из пикселей. Интерференционная картина записывается на фоторезист или другую фоточувствительную пластину. Важным параметром в записывающем устройстве является длина волны лазера, которая подбирается в зависимости от фоточувствительности регистрирующей среды и метода записи. В представленной работе для изготовления дифракционных элементов были разработаны и исследованы прямые методы лазерной записи. Мощность лазера (или энергия импульса) должна быть достаточной для инициирования термохимических и структурных процессов в тонких пленках а-Si и хрома. С другой стороны, поглощение света пленкой увеличивается с уменьшением длины волны. Поэтому предпочтителен лазер с ультрафиолетовым источником. В разработанной установке СЛЗС выбран лазер с длиной волны 355 нм.

Диаграммный блок установки СЛЗС, разработанный с соответствующей документацией, представлен на рис. 2. Система двух- координатного перемещения обеспечивается цифровым контроллером. Это устройство контролирует перемещение стола. Контроллер разработан для управления линейных перемещений стола и синхронизации двигателей.

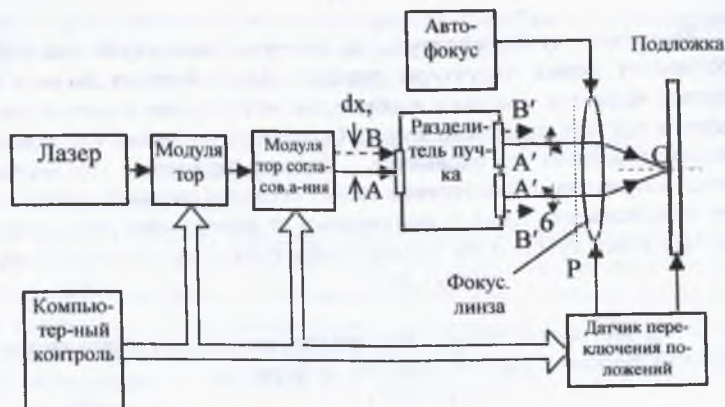


Рис. 2. Схема диаграммного блока.

Датчики скорости и положения работают синусоидально с изменением длины волны лазера. Регулирование синусоидальной волны осуществляется с помощью регулирования тока двигателя линейным датчиком. Разрешение осуществляется на микронном уровне стандартными линейными датчиками положения.

Схематичное изображение двухкоординатной механической системы представлено на рис.3, а его технические характеристики приведены в таблице 1.

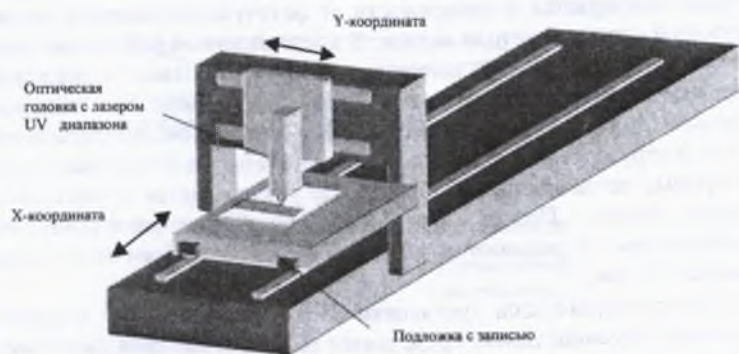


Рис. 3. Схематическое изображение XY-координатной механической системы

Технические характеристики СЛЗС

Габариты системы, мм		1010x825x600
Движение, мм		450
по оси X		320
по оси Y		
Масса, кг		320
Температура эксплуатации, С°		20 ± 5
Максимальные скорости, м/с		0.3
Точность повтора, мкм		2
Точность позиционирования, мкм		± 1

Основным элементом лазерной записи является оптическая система. Оптическая система (рис. 4) была разработана нами для двухкоординатной механической системы, описанной выше (рис.3). В оптической системе используются два независимых 1-D сканера. Для симметричного раздвоения лазерного луча использовалась призма с двумя зеркалами. Поскольку применяли лазер с длиной волны 355 нм, то вся оптика должна быть сделана из кварца. Монтаж оптической системы был выполнен из специальных кварцевых линз. При $L=20$ микрон, частоте импульса лазера - $f_{las} = 5$ кГц, в течение одной секунды данное устройство позволяет делать запись 5000 ОДЭ (или микроголограмму). Самым подходящим источником для записи является лазер Q-switch. Этот лазер обладает возможностью записи короткими импульсами с последовательностью (5-10 наносекунд) и мощными импульсами с частотой от сотен герц до 10-50 кГц. При записи ОДЭ блок управления 12 синхронизирует включение импульсов лазера 1 с движением носителя записи 11 и управляет углом отклонения зеркал дефлекторов 3 и 4, согласно разработанной нами программы. Операция приведения в действие, перекрытие луча лазера во время записи, производится поворотом зеркала одного из дефлекторов на угол больше, чем половина угловой апертуры фокуса объектива. Таким образом, световой пучок перекрывается апертурой фокуса объектива и не проходит на носитель записи. Эта операция обязательна, если делается прерывистая запись.

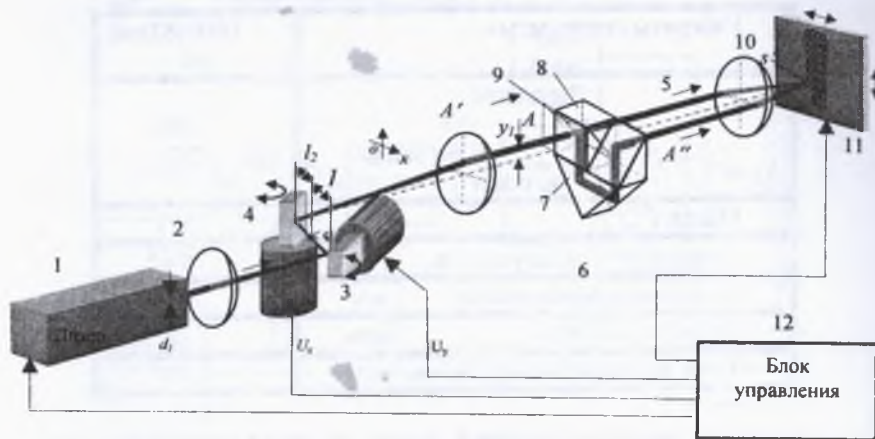


Рис. 4. Оптическая система СЛЭС с двумя 1-D координатными сканерами

В разработанном устройстве каждый ОДЭ может иметь заданную ориентацию и период. Основное условие правильной записи на разработанном устройстве - точная фокусировка лучей A' и A'' в плоскости записываемой среды интерференционной картины и формирования плоскости этих пересечений. Наклоном любых из двух зеркал световой пучок на выходе объектива 5 перемещается по одной из координат, приобретая небольшой наклон, который приводит к погрешности (см. выражение (2)) на расположении интерференционных полос носителя записи 11, как показано на рис.4. Диаметр светового пятна в плоскости записи определяется по формуле

$$W \approx 2.44 \lambda f_3 d_2, \quad (4)$$

где $d_2 = d_1 \cdot f_2 / f_1$ - диаметр светового пучка A' или A'' на входе фокуса объектива 10; f_1 - фокусное расстояние объектива 2.

Отношение величины $\delta = 2\delta_2$ к диаметру его светового пятна - относительная ошибка - характеризует влияние наклона зеркала относительно положения пятна.

$$E = \delta W = l_1 y_1 d_1 / (1.22 \lambda f_1 f_2). \quad (5)$$

Выражение (5) показывает, что для того, чтобы уменьшить погрешность E , необходимо уменьшить расстояние l_1 и увеличить фокусные расстояния f_1 и f_2 . Величина l_1 определяет габаритные размеры зеркал дефлекторов и расстояние между ними, и они не могут быть выбраны произвольно. При указанной величине погрешности E , из выражения (5) следует, что расстояние между одним из зеркал и точкой S не должно превышать:

$$l_1 < 1.22 E \lambda f_1 f_2 y_1 d_1. \quad (6)$$

Если допустимая величина относительного смещения $E = 0.1$, а $\lambda = 0.35 \mu\text{м}$, $f_1 = 150 \text{ мм}$, $f_2 = 100 \text{ мм}$, $y_1 = 1 \text{ мм}$, $d_1 = 1 \text{ мм}$, то расстояние l_1 не должно превышать 0.65 мм .

Таким образом, предложенное устройство предоставляет высокоскоростную запись микроголограмм с помощью импульсного лазера. Оно отличается простотой оптической схемы и отсутствием дорогих и неэффективных акустико-оптических дефлекторов. В качестве источника света может использоваться ультрафиолетовый лазер с длиной волны $200-360 \text{ нм}$. Разработанное устройство отличается очень маленькими потерями световой мощности в оптическом канале, который позволяет полностью использовать мощный лучевой источник и осуществляет метод прямой записи лазером - формирует рельефный образец голограммы непосредственно на поверхности записываемой среды. Поскольку дефлекторные зеркала имеют небольшие размеры, вес и маленькое потребление электроэнергии, то разработанное устройство имеет маленькие размеры. Как лучевой источник мы использовали импульсный лазер с утроенной частотой, со средней мощностью импульса приблизительно 30 мВт , длиной волны 355 нм , продолжительностью импульса приблизительно $5-8 \text{ нс}$. Использовались дефлекторные зеркала с высокой скоростью поворота. Центральные расстояния линз были выбраны согласно параметрам, данным выше в тексте. В качестве носителя записи использовали тонкие пленки хрома и аморфного кремния, нанесенные на стеклянные пластинки методом магнетронного напыления. Были зарегистрированы изображения, содержащие микроголограммы с диаметром приблизительно $6-10 \text{ микрон}$ с периодом линий от 0.8 до 1.4 микрон и с ориентацией линий в пределах диапазона $\theta = 0-90^\circ$. Записи сделаны методом прямой регистрации лазерного луча.

Для разработки устройства записи синтезированных цифровых голограмм необходимо было использовать быстродействующие зеркала дефлекторов с электромеханическим двигателем и датчиками координаты лазерного луча (оптические сканеры). Особенность этих сканеров заключается в том, что за счет противовеса он восстанавливает свое положение за $100 - 750 \text{ нс}$ в зависимости от величины противовеса.

Связь между регулятором системы и сканером осуществляется сервомотором с круговым аналоговым регулятором ПСП (пропорциональный, составной, производный). Сигнал от системы управления передается на сервомотор. При этом цифровую запись голограммы можно считать векторной информацией, записываемой в контексте с оптическим сканером. Для решения проблемы согласования необходимо было создать оптимизированную систему управления. Осо-

облучения - необходимость постоянного обеспечения связи в течение всего процесса. Однако во время реальной записи изображений при изменении траектории необходимо немедленно изменить направление движения лазерного луча, и при этом за счет механической инерции возникает ошибка записи. В связи с этим решено было разработать цифровую систему оптического контроля сканера, который смог бы обеспечить текущее положение луча и вычисление скорости, преобразуя из аналоговых в цифровые угловые величины координаты.

Также было разработано программное обеспечение записи голограмм и контроля СЛЗС.

В главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований, полученных на установке СЛЗС. Экспериментальные исследования на установке СЛЗС были проведены в два этапа:

1. Детальная проверка технических характеристик работы каждого блока и всей системы в целом.

2. Исследование прямой лазерной записи на пленках хрома и аморфного кремния.

В качестве источника света использовалась диодная накачка твердотельного лазера DTL-374CB, при этом были установлены следующие характеристики лазера:

- средняя мощность при 3 кГц (10мкДж) – 20мВт, при 10кГц – 7 мВт.

- длина волны 355 нм.
- стабилизация импульса лазера при 1 кГц, 20мкДж > 5% (1:1.2)
- овальность лазерного луча (1:1.2)
- продолжительность пульсации при 1 кГц < 10нс.
- когерентность света 3-4 мм.

При этом было выявлено, что твердотельный лазер имеет большую нестабильную пульсацию при малой выходной мощности.

В качестве подложки для высокоскоростной записи на СЛЗС были выбраны образцы двух типов пленок:

- пленка аморфного кремния (80 нм толщиной),
- пленка хрома (100 нм толщиной).

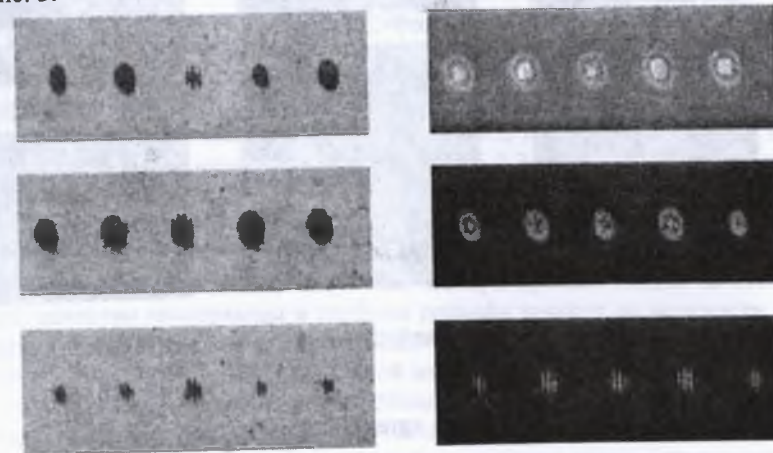
Условия эксперимента:

- размер лазерного пятна на плоскости пленки при 1/2 максимума: 10мкм;
- периодичность интерференции: 10мкм;
- скорость сканирования: 2см/с;
- продолжительность импульсов лазера: 8 нс;
- частота импульсов: 1 кГц;
- энергия импульса лазера (переменная): 1-20 мкДж;

- средняя мощность лазера: < 25 мВт;
- оптическая передача: 40%.

Первые эксперименты показали, что энергия импульсов лазера < 20мкДж продолжительностью в 5нс достаточна для плавления и удаления тонких неорганических пленок a-Si, хрома и органических фоторезистированных пленок. Этот факт экспериментально подтвердил наше предположение о прямой лазерной записи образов решеток и голограмм.

Микрофотографии дифракционных элементов (микроголограммы), записанные на пленках хрома (а) и a-Si (б) лазером, показаны на рис. 5.



а

б

Рис. 5. Микрофотографии дифракционной решетки, записанной с помощью твердотельного лазера на пленке хрома (а) и пленке a-Si (б).

Условия записи для пленок хрома были следующие: средняя мощность на поверхности пленки - 8, 4 и 2 мВт; для пленки a-Si: 3, 1.2 и 0.5 мВт, продолжительность импульса лазера была приблизительно 8 нс. После воздействия пленка хрома была проявлена селективным травлением.

Поскольку дифракционная картина сформирована пересечением двух сфокусированных лазерных лучей, точность фокусировки является очень важным параметром. Результаты исследования влияния фокусировки на форму решетки показаны на рис. 6. Из рисунка видно,

что точность фокусировки - в пределах ± 10 мкм. Зарегистрированные пятна расплываются при большой дефокусировке.

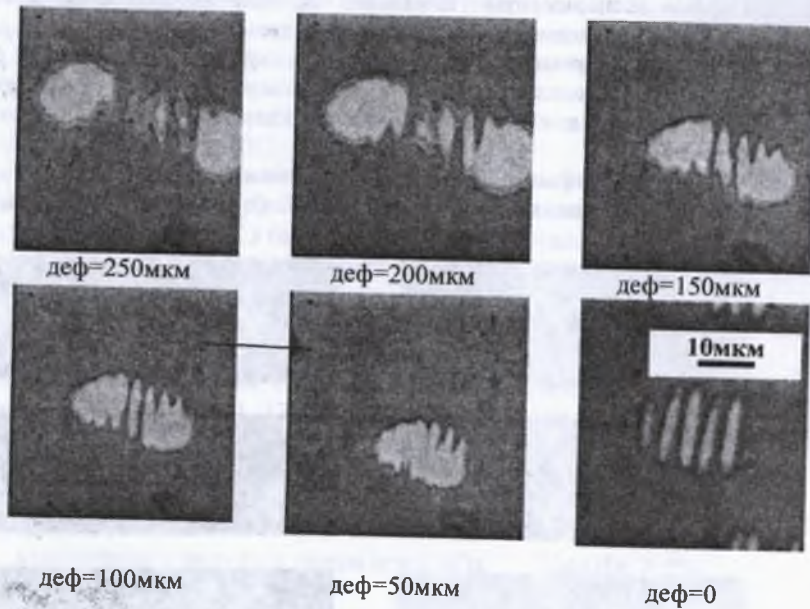


Рис. 6. Микрофотографии пятен с различной дефокусировкой.

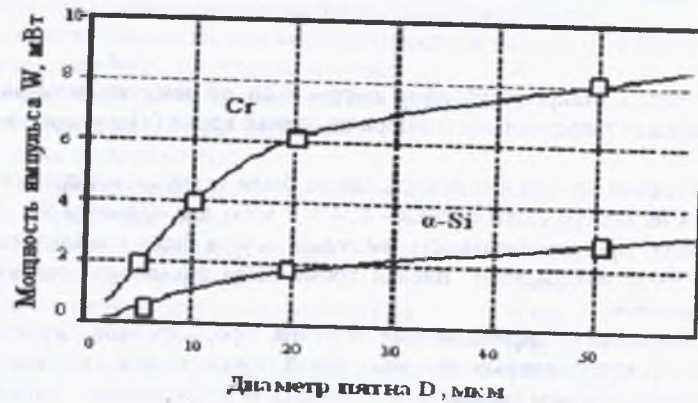


Рис. 7. График зависимости диаметра пятна дифракционного элемента от энергии импульса лазера

Термохимическим травлением была исследована запись линейной решетки с интервалом 0.5-1 мкм. Установлено, что энергия светового импульса УФ лазера поглощается поверхностью, что приводит к увеличению температуры и окислению поверхностного слоя. Динамика лазерной записи выбрана таким образом, чтобы окисление было оптимальным при лазерном сканировании с минимальным тепловым расширением. После экспозиции образец опускался в травитель (каустическая ванна), в котором чистый хром удаляется быстрее, чем окись хрома.

После обработки на поверхности остается окисный слой, полученный после воздействия лазера. Термохимическая очистка устраняет трудности, которые имеются при фоторезистивной записи непосредственно на хромовую подложку. Энергия при записи тестовой структуры уменьшалась от 3.5 мкДж до 0.2 мкДж. Были получены три области. Первая область - область плавления (от 3.5 до 2 мкДж). Вторая область - термохимическая область (от 2 до 0.6 мкДж). Третья область - область слабой лазерной записи (менее 0.5-0.3 мкДж). При этом установлен наибольший уровень, который составил 20 %.

Исследование формирования микрорельефа на пленках α -Si при различной мощности лазера проводилось на микропрофилометре «Профилометр АИМ». Установлено, что при прямой записи на пленке α -Si качество голограммы и глубина рельефа зависят от мощности лазера. Когда средняя мощность выше (> 10 мВт), пленка α -Si испаряется, рельеф отсутствует. При маленькой мощности (0.5-3 мВт) формируется рельеф. Глубина рельефа - 30-50 нм. Это приблизительно соответствует толщине пленок α -Si (60 нм). Имеется два физических явления для объяснения создания рельефа: аморфная пленка нагревается, а затем протекает кристаллизация. Общий вид формы микрорельефа и его профиль, полученные после обработки режимов записи, приведены на рис. 8.

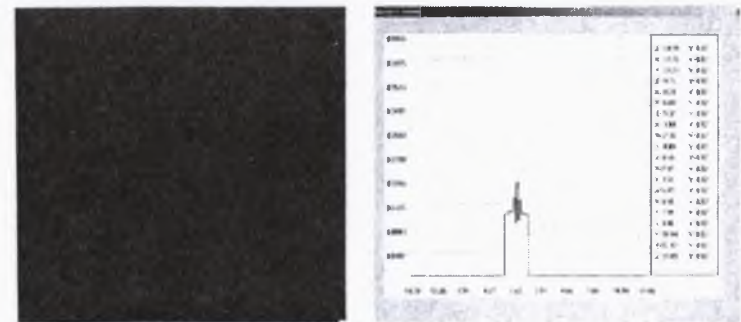


Рис. 8. Форма микрорельефа (а) и профиль рельефа (б).

THE RESUME

Makarov Konstantin Vladimirovich

" Development of the high-speed laser device records and research of process of record diffractions elements radiation of the UV-laser on layers a-Si " the dissertation on competition of a scientific degree of Cand. Tech. Sci. on a speciality 01.04.05 - optics.

Keywords: diffractions elements, a film of amorphous silicon, СЗЛС (high-speed writing down laser system), the laser, a laser plotter, optical system.

The effective high-speed technology of record of reception optical дифракционных elements, on a film of amorphous silicon with processing on a laser plotter is created. The program of reception дифракционных elements on high-speed writing down laser system is developed.

It is established, that as a result of laser influence in пленках amorphous silicon the complex morphological and structural transformations leading creation nanosize optical дифракционных of elements proceed. Amorphous silicon, as a result of local pulse influence, passes in crystal, that, in turn, leads to local increase in volume.

It is established, that under action of laser radiation thermochemical and structural processes occur on all thickness of a film of amorphous silicon, and changes of optical characteristics of a film accompanying them can be used for the control of record.

Set of the scientific results received in the dissertation, pawns scientific bases of creation of new generation of optical elements - precision DOE with binary and piecewise continuous a relief of a surface and their practical application for the decision of the broad audience of problems of information-measuring technics.

РЕЗЮМЕ

Макаров Константин Владимирович

«УФ-Лазердин жардамы менен a-Si кыртышына тез ылдамдыктагы лазерди жазуу түзүлүшүн иштеп чыгуу жана дифракциондук элементтердин жазуу процессин изилдөө».

01.04.05 - оптика кесиби боюнча техника илимдеринин кандидатынын илимий даражадагы издөөнү диссертациясы.

Негизги сөздөр: дифракциондук элементер, аморф кремнийдин пленкалары, (Тез жазуучу лазердик система), лазер, лазердин тетиктери (куруучу), оптикалык система.

Лазердин куруусу астында аморф кремний пленкасына жазылган оптика дифракциондук элементерди эффективдүү тез ылдамдыкта жазуу технологиясы түзүлгөн. Дифракциондук элементерди тез ылдамдыкта жазуучу лазердик системасынын алуу программасы түзүлгөн.

Аморф кремнийдин пленкасына лазердин катышуусунун натыйжасында татаал морфологиялык жана структуралык өзгөрүүлөрү, нано размердеги оптика дифракциондук элементерди түзүүгө алып келери такталган.

Лазердин чагылышынан астында термохимиялык жана структуралык процесстер аморф кремнийдин болгон калыңдыгында пайда болушат, аларды коштоп турган оптикалык пленкалардын мүнөздөмөсүнүн өзгөрүүсүн контролдук жазууга колдонула тургандыгы такталган

Диссертациядан алынган илимдин баардык натыйжалары, илимдин негизин түзөө турган жаны муундагы оптикалык элементерди - прецизиондук ДООри бинардык жана тегиздиктин кесик-үзгүлтүксүз рельефи менен жана алардын практикада колдонушу информациялык-ченөө техникасынын эндүү айланасындагы тапшырмаларды чыгаруу үчүн түзөт.

Публикации по теме диссертации:

1. Макаров К.В., Казакбаева З.М., Югай А. Исследование записи мастер голограмм с синтезированными изображениями. Материалы конференции молодых ученых и специалистов "Оптика 2003", октябрь, Санкт-Петербург, С. 38-39.
2. Макаров К.В. Наноразмерные дифракционные элементы. Наука и новые технологии. Спецвыпуск 2005, С.54-59.
3. A. Poleshchuk, A. Malishev, A. Matochkin, V. Bessmeltsev, N. Goloshevskiy, A. Kutanov, V. Makarov, K. Makarov and I. Snimshchikov High-speed laser writing system for diffractive optoelements and dot matrix holograms fabrication Diffractive optic 2005. Warsaw, Poland, Sep.3-7, 2005, p.120-121.
4. Макаров В.П., Макаров К.В., Казакбаева З. Морфологический анализ записи дифракционных элементов. Вестник КРСУ, 2007, т.7, №8, С. 37-39.
5. К.В. Макаров, Р.К. Курбанов, И.А. Снимщиков, А.А. Кутанов. "Формирование микрорельефа при прямой лазерной записи оптических дифракционных элементов на пленках α -Si". Труды X Международной научной конференции. Казахстан 2007. С. 55-57.
6. А.А. Кутанов, К.В. Макаров, И.А. Снимщиков, Сыдык уулу Нурбек. "Оптическая система записи дифракционных элементов". Известия ВУЗов, №3-4, 2007 г., г.Бишкек, С. 8-11.
7. Казакбаева З.К., Макаров В.П., Макаров К.В. "Методика определения удельной поверхности порошка кремния". ВЕСТНИК Кыргызско-Российского Славянского университета. Том 2. № 2. 2002, Бишкек. С. 19-22.
8. Макаров К.В., Казакбаева З.М., Сыдык уулу Нурбек. "Высокоскоростная запись наноразмерных дифракционных элементов". Сборник тезисов докладов Иссык-кульской Международной летней школы/ SCORPh-2008. 28 июля-3 августа. С 65.

РЕЗЮМЕ

Макаров Константин Владимирович

"Разработка скоростного лазерного устройства записи и исследование процесса записи дифракционных элементов излучением УФ-лазера на слоях α -Si"
 диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук
 по специальности 01.04.05 - оптика.

Ключевые слова: дифракционные элементы, пленки аморфного кремния, СЗЛС (скоростная записывающая лазерная система), лазер, лазерный построитель, оптическая система.

Создана эффективная скоростная технология записи получения оптических дифракционных элементов на пленки аморфного кремния с обработкой на лазерном построителе. Разработана программа получения дифракционных элементов на скоростной записывающей лазерной системе.

Установлено, что в результате лазерного воздействия в пленках аморфного кремния протекают сложные морфологические и структурные превращения, приводящие к созданию наноразмерных оптических дифракционных элементов. Аморфный кремний, в результате локального импульсного воздействия, переходит в кристаллический, что, в свою очередь, приводит к локальному увеличению объема.

Установлено, что под действием лазерного излучения термохимические и структурные процессы происходят по всей толщине пленки аморфного кремния, а сопровождающие их изменения оптических характеристик пленки можно использовать для контроля записи.

Совокупность научных результатов, полученных в диссертации, закладывает научные основы создания нового поколения оптических элементов - прецизионных ДОЭ с бинарным и кусочно-непрерывным рельефом поверхности и их практического применения для решения широкого круга задач информационно-измерительной техники.

МАКАРОВ КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ

**Разработка скоростного лазерного устройства
записи и исследование процесса записи дифракционных элементов
излучением УФ-лазера на слоях a-Si**

Подписано в печать 23.10.08.
Формат 60*90 1/16
Печать офсетная. Объем 1,7 п.л.
Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии "Махprint"
г. Бишкек, ул. Чубак 30.