

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Руслан Владимирович Шиманский

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник, тел. (383) 333-30-91, e-mail: shimansky@iae.nsk.su

Андрей Юрьевич Костяничников

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, студент, тел. (913) 063-85-74, e-mail: akostyanichnikov@gmail.com

Роман Игоревич Куц

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, техник-программист, тел. (953) 890-39-36, e-mail: r.i.kuts@mail.ru

Дмитрий Александрович Белоусов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник, тел. (383) 330-79-31, e-mail: BelousovDA@iae.nsk.su

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, тел. (383) 333-10-65, e-mail: korolkov@iae.nsk.su

Работа посвящена экспериментальному исследованию эффективности метода измерения погрешностей изготовления компьютерных синтезированных голограмм с использованием специализированных меток. Каждая метка представляет собой две совмещенные дифракционные решетки с одинаковыми скважностью и периодом, первая из которых записывается до записи, а вторая – в процессе формирования структуры голограммы. Для определения погрешности записи применялся метод оптической дифрактометрии. Представлены результаты экспериментального исследования зависимости дифракционной эффективности метки от взаимного смещения частей микрорешеток. Экспериментально смоделирована погрешность изготовления синтезированной голограммы, возникающая в процессе длительной записи дифракционного оптического элемента.

Ключевые слова: прямая лазерная запись, лазерная записывающая система, дифракционный оптический элемент, погрешность изготовления, дифракционная эффективность

APPLICATION OF OPTICAL DIFFRACTOMETRY FOR THE ERROR MONITORING OF MANUFACTURING OF PRECISION OPTICAL ELEMENTS

Ruslan V. Shimansky

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383) 333-30-91, e-mail: shimansky@iae.nsk.su

Andrey Yu. Kostyanichnikov

Novosibirsk State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Student, phone: (913) 063-85-74, e-mail: akostyanichnikov@gmail.com

Roman I. Kuts

Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Technician-Programmer, phone: (953) 890-39-36, e-mail: r.i.kuts@mail.ru

Dmitriy A. Belousov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383) 330-79-31, e-mail: BelousovDA@iae.nsk.su

Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Deputy Director, phone: (383) 333-10-65, e-mail: korolkov@iae.nsk.su

The work is devoted to an experimental study of the effectiveness of the method for measuring errors in manufacturing of computer-generated synthesized holograms using specialized marks. Each mark represents two aligned diffraction gratings with the same duty cycle and period, the first of which is formed before writing, and the second is formed in the process of forming the structure of the hologram. To determine the writing error, the method of optical diffractometry was used. The results of an experimental study of dependence of diffraction efficiency of the mark on the mutual displacement of parts of the microgratings are presented. The error manufacturing of a synthesized hologram arising during long-term writing of a diffractive optical element has been simulated experimentally.

Keywords: direct laser writing, laser writing system, diffractive optical element, manufacturing error, diffraction efficiency

Контроль точности изготовления прецизионных синтезированных структур или дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является актуальной задачей, в особенности для их применения при интерферометрических измерениях асферических поверхностей [1]. Погрешности изготовления прецизионных структур влияют на искажения формируемого волнового фронта. Воздействие внутренних и внешних факторов на систему записи (сдвиг подложки, температурный дрейф, изменение атмосферного давления и т.п.), возникающее в процессе изготовления структуры ДОЭ, приводит к отклонениям формируемой структуры на подложке от расчетной.

В ИАиЭ СО РАН была разработана и используется прецизионная круговая лазерная записывающая система (КЛЗС) CLWS300IAE, оптимизированная для записи прецизионных синтезированных структур [2]. В настоящее время КЛЗС используются в ряде научных и промышленных организаций России, Германии, Китая [3–5]. Несмотря на высокую скорость сканирования в КЛЗС, время записи ДОЭ больших размеров может достигать десяти часов и более. В течение этого времени абсолютная погрешность позиционирования записывающего пучка по всему полю ДОЭ не должна превышать 10 нм.

Для осуществления контроля погрешностей изготовленного ДОЭ по двум координатам было предложено формировать специальные координатные метки в виде дифракционных микрорешеток [6]. Данные метки состоят из двух частей. Одна из них формируется до записи ДОЭ. Вторая часть записывается одновременно с основной дифракционной структурой в выделенных небольших окнах в области ДОЭ. Для определения погрешности изготовления ДОЭ как по радиальной, так и по угловой координате, метки наносятся попарно, а направления штрихов периодических решеток в них ортогональны. Сдвиг между первой и второй частью марок позволяет определить погрешность изготавливаемого ДОЭ по обеим координатам. Данный метод контроля погрешности записи может использоваться как на системах с круговой системой сканирования, так и на X - Y системах лазерной записи.

Существует несколько топологий координатных меток. В нашей работе мы рассматриваем смешанную двухкоординатную метку, топология которой позволяет использовать метод оптической дифрактометрии. Смешанная двухкоординатная метка представляет собой две совмещенные дифракционные решетки (рис. 1) с одинаковыми шириной штриха (W) и периодом (P). Одна из решеток записывается до записи основной структуры элемента, а вторая непосредственно в процессе записи, с заранее заданной величиной смещения относительно первой (d'). Для определения оптимального смещения было проведено математическое моделирование.

Моделирование [6] показало, что при увеличении смещения между центрами линий решетки смешанной двухкоординатной метки дифракционная эффективность для первого порядка уменьшается, в то время как для второго – увеличивается. Существует такое оптимальное смещение d' , при котором эффективность обоих порядков совпадает. Оптимальное смещение может использоваться во время записи второй части метки и будет соответствовать отсутствию погрешности в структуре синтезированной голограммы.

Неоптимальное смещение записанных решеток друг относительно друга будет приводить к перераспределению интенсивностей дифрагированного излучения между дифракционными порядками. Таким образом, измерив интенсивности дифракционных порядков при освещении сформированной двухкоординатной метки пробным лазерным пучком, можно определить величину смещения решеток друг относительно друга, которая будет соответствовать погрешности структуры по одной из координат.

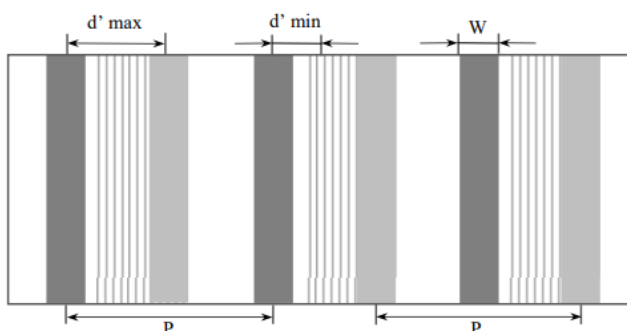


Рис. 1. Геометрия амплитудной решетки: P – период каждой из решеток; W – ширина линии; d' – смещение одной решетки относительно другой

Целью данной работы было экспериментально проверить результаты математического моделирования и показать применимость метода, сформировав координатные метки с различными значениями смещения d' , смоделировав различную степень ошибки позиционирования реальной записывающей системы.

Для нанесения микрорешеток смешанным методом на пленке хрома использовалась установка X-Y лазерного нанолитографа с длиной волны записывающего излучения 405 нм и диаметром пятна ~ 350 нм [7]. Для достижения режима термохимического окисления была определена критическая мощность лазерного излучения, ниже которой структуры образуются именно посредством термохимии. Были записаны тестовые структуры с различной мощностью излучения в пределах от 30 до 0 мВт. После записи тестовые структуры подверглись травлению с использованием селективного травителя хрома [8]. Таким образом была оопределена мощность, равная 10 мВт, выше которой наблюдался режим прожига, а не термохимического окисления хрома. В дальнейшем запись микрорешеток проводилась при мощности 9 мВт.

Микрорешетки с периодом $P = 5$ мкм были сформированы методом непрерывной лазерной записи со скоростью 1,64 мм/с. Каждый штрих решетки состоял из двух проходов лазерного пятна с шагом 0,25 мкм. Ширина такого штриха равнялась ~ 1 мкм. При этом, значение смещения d' изменялось от 1,5 до 2,3 мкм с шагом 0,2 мкм.

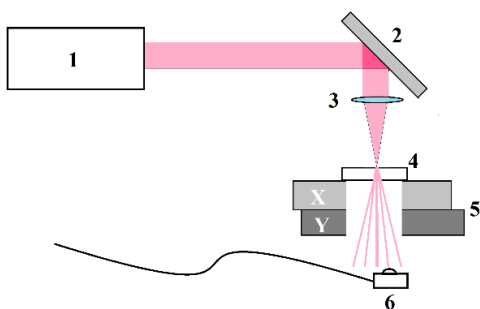


Рис. 2. Оптическая схема для дифрактометрии: 1 – лазер; 2 – зеркало; 3 – линза; 4 – образец; 5 – X-Y стол; 6 – измеритель мощности

С целью измерения дифракционной эффективности меток использовался метод оптической дифрактометрии, для применения которого был собран оптический стенд на основе схемы, приведенной на рис. 2. Лазерный пучок с длиной волны $\lambda = 633$ нм вертикально падает на линзу ($F = +10$ см) фокусируется на образце с нанесенными на него тестовыми микрорешетками. Диаметр пятна в перетяжке ~ 100 мкм. Образец расположен на подвижном X-Y столе, в котором выточено окно для прохождения дифракционных порядков. С помощью измерителя мощности регистрируется интенсивность первого и второго порядков.

На рис. 3,а приведены результаты моделирования [6] зависимости дифракционной эффективности от величины сдвига между микрорешетками для разных ширины линий (квадраты – 1,3 мкм, круги – 1, мкм, треугольники – 0,9 мкм). Пары кривых для каждой ширины линии пересекаются около оптимального значения смещения $d'_{opt} = 1,75$ мкм.

На рисунке 3,б показаны полученные в рамках данной работы экспериментальные результаты измерения эффективностей первого и второго дифракционных порядков от величины смещения. Видно, что пересечение двух кривых происходит при смещении $d'_{opt} \approx 1,7$ мкм. Результат экспериментальной работы

показывает высокую корреляцию с математическим моделированием, что доказывает возможность применения метода смешанных координатных меток для контроля погрешности изготовления дифракционных оптических элементов.

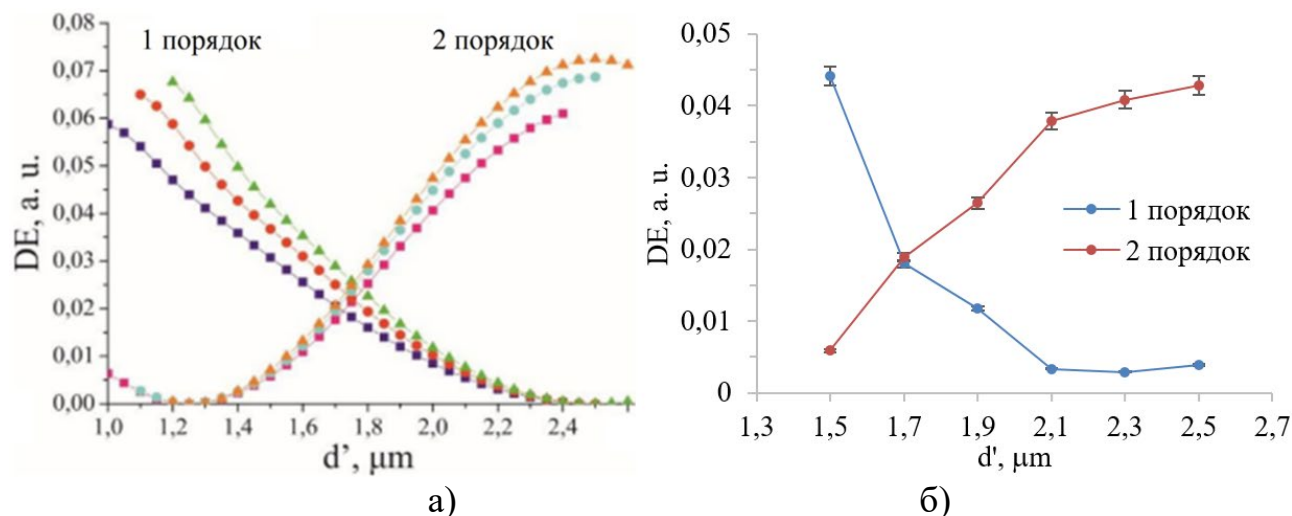


Рис. 3. Зависимости дифракционной эффективности от смещения между центрами линий решетки:

а) расчетная; б) экспериментальная

Очевидное преимущество метода – количественная оценка точности позиционирования структур ДОЭ с использованием оптического эффекта интерференции. Однако, как показал эксперимент, недостатком метода является требование к точности измерения эффективности порядков. Погрешность в измерении дифракционной эффективности в 5% приведет к ошибке определения погрешности позиционирования на значение ~ 100 нм. Такая погрешность измерения не достаточна для контроля точности изготавливаемых ДОЭ для реальных задач. Несмотря на перспективность данного метода, необходимо значительно увеличить точность измерительного стенда и подобрать оптимальные параметры записи координатных меток.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 17-19-01721-П). В исследованиях использовано оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шиманский Р. В., Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. Методы увеличения точности нанопозиционирования в системах синтеза дифракционной оптики // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. 5, № 1. С. 65–70.
2. Ведерников В. М., Вьюхин В. Н., Кирьянов В. П. и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов // Автотометрия. 1981. № 3. С. 3–16.
3. Казанский Н. Л. Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 2006. № 29. С. 58–77.

4. Annual report 2013/2014 / Institut für Technische Optik Universität Stuttgart. Stuttgart, 2014. P. 3.
5. Duoshu W., Luo C., Xiong Y. et al. Fabrication technology of the centrosymmetric continuous relief diffractive optical elements // Phys. Procedia. 2011. 18. P. 95–99.
6. Shimansky R.V., Nasyrov R.K., and Belousov D.A. Measuring fabrication errors of computer-generated holograms using embedded microgratings // Proc. SPIE 11551, Holography, Diffractive Optics, and Applications X, 115510L.
7. Korolkov V.P, Kuts R.I., Malyshev A.I., Matochkin A.E., Shimansky R.V., Dry method for the formation of reflective phase DOEs using direct laser writing on thin Zr films // Proc. SPIE 11551, Holography, Diffractive Optics, and Applications X, 115511O.
8. . В. П. Коронкевич, А. Г. Полещук, Е. Г. Чури́н, Ю. И. Юрлов, Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома, Письма в ЖТФ, 1985, том 11, выпуск 3, 144–148.

© *Р. В. Шиманский, А. Ю. Костяничников, Р. И. Куц,
Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, 2021*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ МИКРОРЕЛЬЕФА НА ДВУХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЕ А-SI/AG

Нурбек Сыдык уулу

Институт физико-технических проблем и материаловедения им. академика Ж. Жеенбаева Национальной Академии наук Кыргызской Республики, 720071, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Чуй, 265а, научный сотрудник, лаборатории «Лазерные технологии», тел. (996)312-64-26-77, e-mail: s.nurbek@mail.ru

Аскар Асанбекович Кутанов

Институт физико-технических проблем и материаловедения им. академика Ж. Жеенбаева Национальной Академии наук Кыргызской Республики, 720071, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Чуй, 265а, доктор технических наук, академик НАН КР, заведующий лабораторией «Лазерные технологии», тел. (996)312-64-26-77, e-mail: askarktnv@gmail.com

Замиргуль Мукамбетовна Казакбаева

Кыргызско-Турецкий университет Манас, 720042, Кыргызская Республика, г. Бишкек, проспект Мира 56, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры компьютерной инженерии, тел. (996)312-49-27-88, e-mail: zamirgul@gmail.com

В данной работе представлены результаты прямой лазерной записи на двухслойной структуре аморфный кремний/серебро, нанесенной на стеклянную подложку методом магнетронного напыления. Исследованы спектры поглощения пленок а-Si различной толщины и стеклянной подложки. Предложен метод прямой лазерной записи микроструктур сфокусированным излучением одномодового полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda = 405$ нм на двухслойной среде а-Si/Ag со стороны стеклянной подложки. Исследовано формирование микрорельефа при прямой записи импульсами сфокусированного излучения полупроводникового лазера с $\lambda = 405$ нм на слое а-Si. Оптимизированы параметры двухслойной структуры а-Si/Ag для прямой лазерной записи.

Ключевые слова: прямая лазерная запись, двухслойная структура аморфный кремний/серебро, полупроводниковый лазер, микрорельеф

STUDY OF DIRECT LASER RECORDING OF MICRO-RELIEF ON A TWO-LAYER A-SI/AG STRUCTURE

Nurbek Sydyk uulu

Academic J. Jeenbaev Institute of physics-technical problems National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 265a, Prospect Chui St., Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, Researcher of Laboratory of Laser Technologies, phone: (996)312-39-20-57, e-mail: s.nurbek@mail.ru

Askar A. Kutanov

Academic J. Jeenbaev Institute of physics-technical problems National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 265a, Prospect Chui St., Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, D. Sc., NAS KR Academician, phone: (996)312-39-20-57, e-mail: askarktnv@gmail.com

Zamirgul M. Kazakbaeva

Kyrgyz Turkish Manas University, 56, Prospect Mira, Bishkek, 720042, Kyrgyz Republic, Ph. D., Associate Professor of the Department of Computer Engineering, phone: (996)312-49-27-88, e-mail: zamirgul@gmail.com

This paper presents the results of direct laser recording on a two-layer amorphous silicon / silver structure deposited on a glass substrate by magnetron sputtering. The absorption spectra of a-Si films of various thicknesses and a glass substrate are investigated. A method is proposed for direct laser recording of microstructures by focused radiation of a single-mode semiconductor laser with a wavelength of $\lambda = 405$ nm on a two-layer a-Si / Ag medium from the side of a glass substrate. The formation of the micro relief is studied during direct recording by semiconductor laser pulses with $\lambda = 405$ nm on the a-Si layer. Parameters of two-layer structure a-Si / Ag for direct laser recording are optimized.

Keywords: direct laser recording, two-layer structure amorphous silicon/silver, semiconductor laser, micro relief

Введение

Основой современных методов защиты продукции, товаров, документов и ценных бумаг являются оптические и голографические технологии. Требуется разработка новых методов записи голограмм и микроструктур, материалов, упрощающих технологичность, идентификацию и проверку подлинности. Создание национальных средств защиты документов, ценных бумаг и особо ценных объектов является одной из важных государственных задач, обеспечивающих ее национальную и экономическую безопасность.

Прямая лазерная запись с высоким разрешением на пленках аморфного кремния без мокрой химической обработки представляет интерес для записи микроструктур, дифракционных оптических элементов, dot matrix голограмм [1,2]. Ранее нами были исследованы возможности получения интерференционных фильтров на пленках аморфного кремния и прямой лазерной записи на них [3]. Разработано магнетронное устройство, позволяющее напылять однородные пленки аморфного кремния [4]. Данное магнетронное распылительное устройство позволяет проводить напыление пленочных элементов на различные материалы.

Целью настоящей работы является исследование нового метода прямой лазерной записи с формированием рельефа на двухслойной структуре аморфный кремний/серебро, нанесенной на стеклянную подложку, при воздействии сфокусированным лазерным излучением на слой аморфного кремния со стороны подложки, определение оптимальных параметров двухслойной структуры a-Si/Ag по толщине напыления слоев.

С этой целью для улучшения формирования рельефа лазерной записи на слой аморфного кремния наносился тонкий слой серебра. Как известно, серебро обладает высокими характеристиками теплопроводности и электропроводности, что важно при локальном нагреве аморфного кремния сфокусированным лазерным лучом.

Двухслойная структура α -Si/Ag, нанесенная на стеклянную подложку

Для исследования прямой лазерной записи микроструктур изготавливались образцы двухслойной структуры α -Si/Ag магнетронным нанесением при высокочастотном поле. В результате проведенных исследований по получению плёнок α -Si на магнетронной установке отлажена технология нанесения однородных слоев аморфного кремния и тонких пленок металла на стеклянную подложку для прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов. Толщина пленок двухслойной структуры α -Si/Ag варьировалась в пределах от 0,1 мкм до 2,0 мкм.

Поглощение света в тонких пленках α -Si

Для измерения спектров поглощения в тонких пленках α -Si использован двухлучевой спектрофотометр PYE UNICAM 100. Основные элементы оптической схемы прибора показаны на рис. 1. Она содержит источник света, переключатель лучей, попеременно подающий лучи в два измерительных оптических канала, а также зеркала, направляющие оба луча в фотоприемник. Верхний по схеме канал назовем опорным, а нижний – предметным.

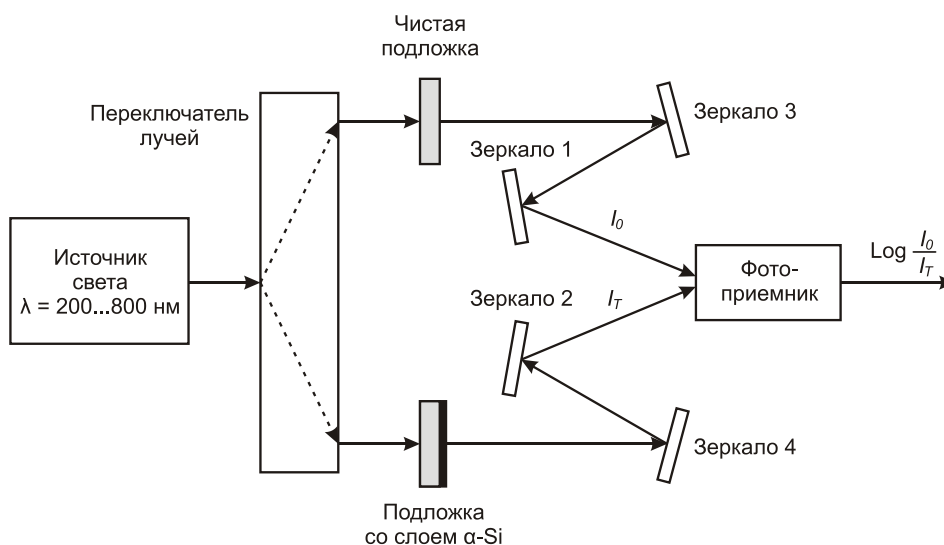


Рис. 1. Схема измерения спектров поглощения материалов

Электронная схема, обрабатывающая сигналы с выхода фотоприемника, вычисляет десятичный логарифм отношения интенсивности света из опорного канала (I_0) к интенсивности света из предметного канала (I_T):

$$K_T = \log \frac{I_0}{I_T}.$$

Исследуемая стеклянная подложка со слоем α -Si помещалась в предметный канал. Для того, чтобы из результата измерения вычесть величину поглощения в подложке, в опорный канал помещалась идентичная чистая подложка.

Исследованы образцы с различной толщиной слоя α -Si. Полученные спектры поглощения показаны на рис. 2.

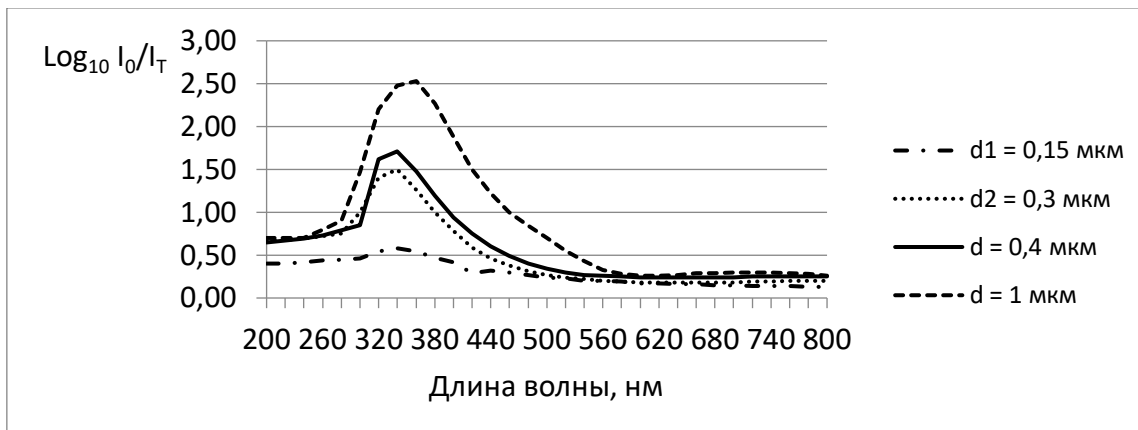


Рис. 2. Спектры поглощения в пленках α -Si различной толщины

Видно, что максимум поглощения света приходится на область длин волн 340...360 нм. Как следует из графика на рис.2, излучение полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda = 405$ нм, также будет хорошо поглощаться пленкой аморфного кремния с толщиной 1мкм.

Спектр поглощения света в стеклянной подложке

Схема для измерения спектра поглощения стеклянной подложки идентична схеме на рис. 3, с той лишь разницей, что одна чистая подложка помещена в предметный канал спектрофотометра. Толщина подложки составляет 1,35 мм. Спектр поглощения чистой подложки показан на рис. 3.



Рис. 3. Спектр поглощения стеклянной подложки

Видно, что в диапазоне длин волн 360–800 нм поглощение света в подложке практически постоянно и минимально. На основе исследованных спектров поглощения тонких слоев аморфного кремния и стеклянной подложки сделан вывод о возможности прямой лазерной записи на слое a-Si со стороны стеклянной подложки полупроводниковым лазером с $\lambda = 405$ нм.

Прямая лазерная запись на двухслойной структуре a-Si/Ag

Прямая лазерная запись на двухслойной структуре a-Si/Ag проводилась на двухкоординатной экспериментальной установке [5]. Воздействие на двухслойную пленочную структуру аморфный кремний/серебро, сфокусированным лазерным излучением проводили через стеклянную подложку. Наноразмерный слой серебра был нанесен с целью создания проводящего слоя и возможности создания плазмона, улучшения защиты слоя аморфного кремния от воздействия окружающей среды. При связывании энергии фотона со свободными электронами металла может быть создан субволновой колебательный режим, известный как плазмон.

Для прямой записи на аморфном кремнии использовался одномодовый полупроводниковый лазер с $\lambda=405$ нм мощностью 120 мВт. Лазерный пучок коллимировался асферической линзой, а затем фокусировался микрообъективом на регистрирующую среду. Глубина фокуса изменялась для записи отдельных фрагментов изображения. Перетяжка формируемого лазерного пучка позволяла сохранять необходимую плотность энергии записи на аморфном кремнии. Длительность лазерных импульсов, их частота и движение координатного стола управлялись компьютером. Для прямой лазерной записи использовалась двухслойная структура a-Si/Ag различной толщины $\sim 0,5\text{--}2$ мкм.

Результаты лазерной записи микроструктур с формированием рельефа на поверхности двухслойной структуры a-Si/Ag, нанесенной на стеклянную подложку приведены на рис.4.

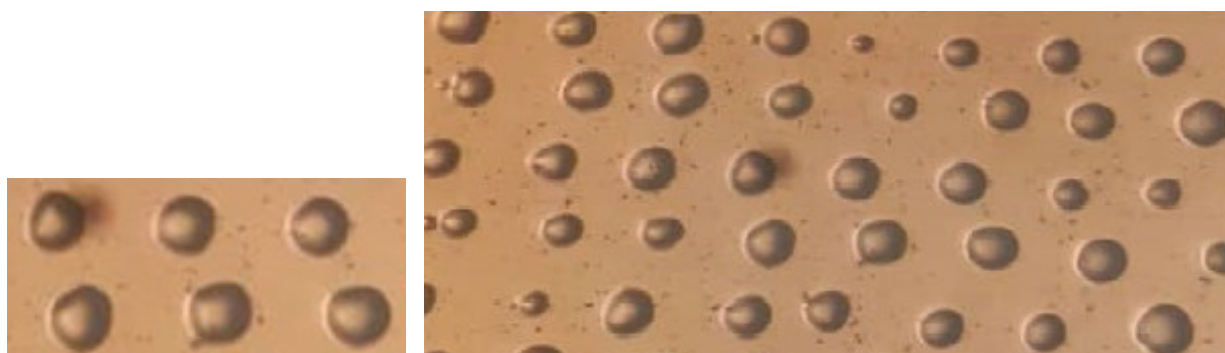


Рис. 4. Фотография микроструктуры сфокусированным лазерным излучением с $\lambda= 405$ нм на двухслойной структуре a-Si/Ag с размером элементов 30-40 мкм

На рис.5 приведена фотография прямой лазерной записи аббревиатуры ИФ (Институт физики) на структуре a-Si/Ag. Фотографии были сняты на микроскопе (MICRO 200T-01).

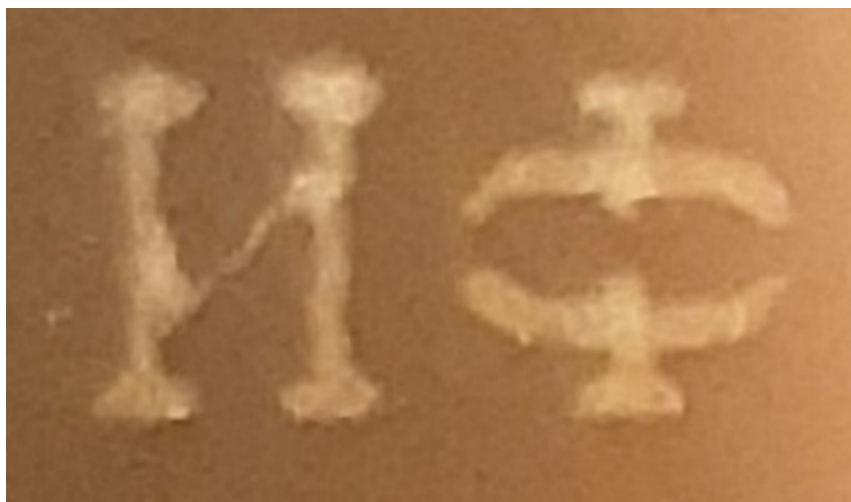


Рис. 5. Фотография записи аббревиатуры ИФ сфокусированным лазерным излучением ($\lambda = 405$ нм) на двухслойной структуре a-Si/Ag

Заключение

Разработан новый метод прямой лазерной рельефной записи на двухслойной структуре a-Si/Ag посредством ее деформирования за счет локального увеличения объема подслоя аморфного кремния при прямом лазерном воздействии со стороны подложки и переходе среды от аморфного состояния к полукристаллическому. Определены оптимальные параметры двухслойной структуры a-Si/Ag по толщине напыления для прямой лазерной записи. Данный метод представляет интерес для упрощения технологии изготовления мастер матриц для производства радужных голограмм, прямой лазерной записи микроструктур, дифракционных оптических элементов, dot matrix голограмм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корольков В.П., Чернухин В.П. Оптическая запись на пленках аморфного кремния с субмикронным разрешением // Журнал технической физики – 1989. – Т. 59 – вып. 6. – С.131-133.
2. Poleshchuk A G, Kutanov A *et al* Microstructuring of Optical Surfaces: Technology and Device for Direct Laser Writing of Diffractive Structures *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2010. – 46. – P.171–180.
3. Кутанов А.А., Н. Сыдык уулу, Снимщиков И.А., Великасов С.С., Макаров В.П. Спектральные интерференционные фильтры на пленках аморфного кремния и прямая лазерная запись на них // Мир голографии – 2016. – Т. 2, №1. – С. 83-87.

4. Макаров В.П., Великасов С.С., Макаров К.В., Календеров А.Ж., Сыдык уулу Н. Магнетронная напылительная система для получения пленок α -Si // Труды Международного семинара «Оптика и фотоника», Иссык-Куль, Кыргызстан. – 2012. – С. 126-128.

5. Устройство для записи дифракционных элементов: Патент № 007874 Евраз. патент, G 02 B 5/18 / Полещук А.Г., Кутанов А.А., Бесмельцев В.П., Снимщиков И.А., Опубл. 27.02.2007, Бюл. № 1.

© Н. Сыдык уулу, А. А. Кутанов, З. М. Казакбаева, 2021