

Прямая запись микроструктур на пленках аморфного кремния излучением полупроводникового лазера с $\lambda = 405 \text{ nm}$

А. А. Кутанов¹, В. П. Корольков², Н. Сыдык уулу¹, Р. И. Куц²

¹ Институт физики имени академика Ж. Ж. Жеенбаева, Национальная Академия наук, Бишкек, Киргизия

² Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск, Россия

Исследованы спектры поглощения тонких пленок аморфного кремния и возможности записи на них микроструктур излучением полупроводникового лазера с $\lambda=405 \text{ nm}$. Получены результаты полутонковой прямой лазерной записи микроструктур на пленках аморфного кремния с шириной линий $\sim 1 \text{ мкм}$ лазерного излучения на лазерном нанолитографе. Зафиксировано увеличение толщины пленок на облученных участках пленок кремния под тепловым действием лазерного излучения при переходе аморфного кремния в кристаллическую структуру. Нелинейная зависимость диаметра записываемого элемента на пленках аморфного кремния от энергии импульса лазера позволяет записывать микроструктуры размером меньше длины волны при изготовлении фотошаблонов и дифракционных оптических элементов

Ключевые слова: Аморфный кремний, прямая лазерная запись, оптика, голография, дифракционные оптические элементы.

Цитирование: Кутанов, А. А. Прямая запись микроструктур на пленках аморфного кремния излучением полупроводникового лазера с $\lambda = 405 \text{ nm}$ / А. А. Кутанов, В. П. Корольков, Н. Сыдык уулу, Р. И. Куц // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 78–83.

Введение

Прямая лазерная запись на пленках аморфного кремния в отсутствие мокрой химической обработки представляет интерес для высокоразрешающей записи фотошаблонов и дифракционных оптических элементов [1]. При создании лазерных записывающих систем (ЛЗС) для записи фотошаблонов и дифракционных оптических элементов (ДОЭ) необходимо выбрать оптимальный лазер и регистрирующую среду. Для этой цели требуется определить условия, когда энергия лазерного излучения наиболее эффективно поглощается в регистрирующей среде. Поэтому на однолучевом спектрофотометре Helios Omega измерены спектры поглощения пленок *a-Si* толщиной 0,2–0,7 мкм, нанесенных на подложке стекла методом магнетронного напыления. В качестве подложек были использованы стекла толщиной 1,25 мм. В работе актуальна задача исследования возможности полутонковой прямой лазерной записи на *a-Si* излучением полупроводникового лазера с $\lambda = 405 \text{ nm}$.

1. Измерение спектров поглощения тонких пленок *a-Si*

Тонкие пленки аморфного кремния толщиной 0,2–0,7 мкм на стеклянной подложке для измерения спектра поглощения пленки *a-Si* были получены на магнетронной распылительной системе [2]. Измерения спектров поглощения пленок *a-Si* на стеклянной подложке были выполнены с использованием однолучевого спектрофотометра Helios Omega.

Базовая линия сканировалась на чистом стекле и после этого на держатель образца прикреплялся носитель с пленкой α -Si нанесенной на стекло. Были измерены спектры поглощения пленки аморфного кремния толщиной от 0,2, 0,5 и 0,7 мкм (Рис.1). Видно, что максимум поглощения света приходится на область длин волн 300...360 нм.

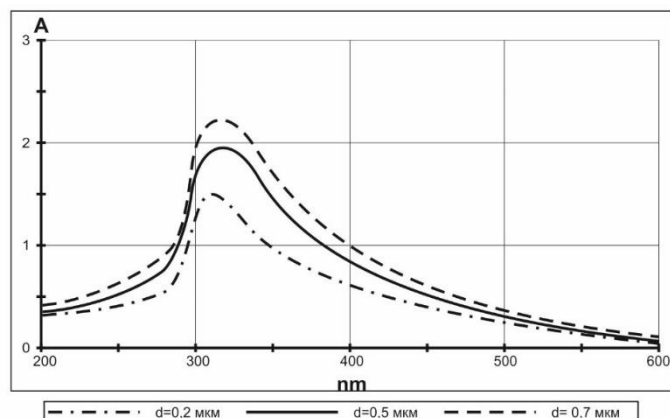


Рис. 1. Спектры поглощения тонких пленок α -Si.

На основе проведенных измерений сделан вывод, что для прямой записи на слоях α -Si наиболее предпочтительны лазеры с длиной волны 355–405 нм. Ранее, прямая лазерная запись с использованием твердотельного лазера с диодной накачкой DPSS ($\lambda = 355$ нм) исследовалась в работе [1]. В настоящей работе исследуются возможности полутонковой прямой лазерной записи на α -Si излучением полупроводникового лазера с $\lambda=405$ нм.

2. Полутонковая прямая лазерная запись на α -Si

Излучение лазера локально вызывает кристаллизацию тонких пленок аморфного кремния и изменение показателя преломления, посредством быстрого нагрева и отвердевания [1], а также образование поверхностного рельефа. Это дает возможность прямой лазерной записи дифракционных структур, исключив традиционные технологические этапы, такие как проявка, травление и т.п.

В предварительных экспериментах для прямой записи на аморфном кремнии использовался 120 мВ одномодовый Blu-Ray лазер с длиной волны 405 нм. Лазерный луч коллимировался с помощью асферической линзы после лазера, а затем он фокусировался микрообъективом на носитель записи. Длительность лазерных импульсов и их частота контролировалась от компьютера. На Рис.2 приведена фотография, снятая на микроскопе в проходящем свете для линий записанных с помощью одномодового Blu-Ray лазера на пленки α -Si на стеклянной подложке. При записи пластина непрерывно перемещается с помощью 2D позиционирующего устройства, а серия импульсов лазера записывает последовательность микроструктур.

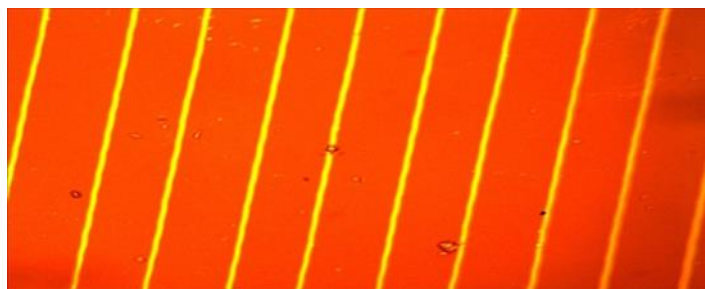


Рис. 2. Микрофотография дорожек, записанной прямой лазерной записью на слое аморфного кремния одмодовым полупроводниковым лазером с мощностью 120 мВт

При гауссовом распределении интенсивности излучения лазерного пучка и благодаря нелинейному характеру записи имеется возможность записи микроструктуры на пленках *a-Si* при диаметре сфокусированного лазерного луча

$$D \sim \lambda/NA, \quad (1)$$

где *NA*- числовая апертура записывающего объектива, которая для сухого высоко апертурного объектива будет достигать значения 0,95.

На Рис. 3 приведен график зависимости ширины следа на пленке аморфного кремния от энергии импульса лазера.

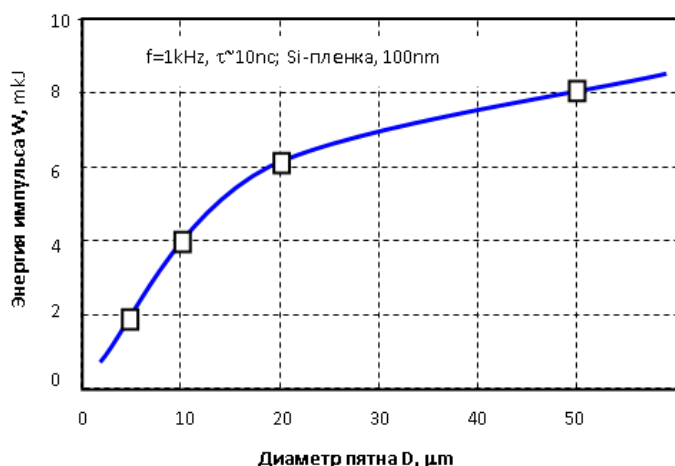


Рис. 3. График зависимости ширины следа на пленке *a-Si* от энергии импульса лазера. Данный график показывает нелинейный характер процесса записи на слое аморфного кремния при воздействии УФ лазерного излучения.

3. Запись микроструктур на тонких пленках *a-Si* излучением полупроводникового лазера с $\lambda=405 \text{ nm}$

Эксперименты по полутонковой лазерной записи на тонких пленках аморфного кремния проводились также на прецизионном сканирующем X-Y лазерном нанолитографе (ЛНЛ), разработанном в Институте автоматизации и электротехники СО РАН. Для повышения степени плоскостности формируемого волнового фронта коллимированного лазерного пучка перед фокусирующим объективом в ЛНЛ использовался пространственный фильтр с диафрагмой диаметром 10мкм. Проведены эксперименты с изменением мощности лазера от 2 до 60 мВт,

длительность импульсов равнялась 2 мкс, расстояние между импульсами изменялось по координате x-y от 250-5000 нм. С изменением мощности лазера и длительности по координатам x-y получены полутонные записи на пленках аморфного кремния, что показано на рис. 4. Оптическая схема ЛНЛ [2] позволяет формировать в фокальной плоскости записывающего объектива сфокусированное пятно размером ~350 нм для записи на пленки a-Si.

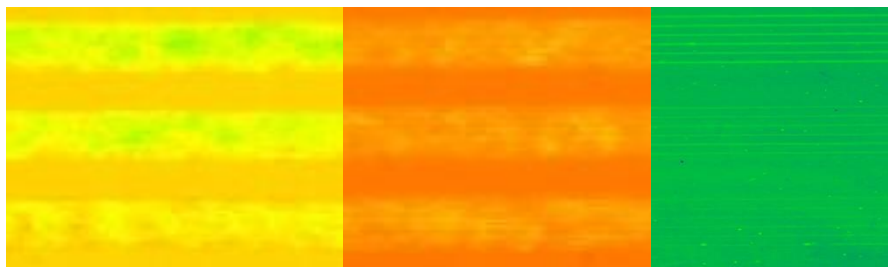


Рис 4. Микрофотография полутонных тестовых записей на пленке a-Si.

На рис. 5. видно что из результаты записанных контрастных изображений показывают, структурные и морфологические изменения на поверхности пленок аморфного кремния. На участках лазерного воздействия кремний переходит из неупорядоченной аморфной фазы в упорядоченную кристаллическую структуру. Переход к упорядоченному расположению атомов с увеличением расстояния между ними приводит к увеличению объема и появлению рельефа на поверхности аморфного кремния. Полученные график показывает образование рельефа на пленках a-Si.

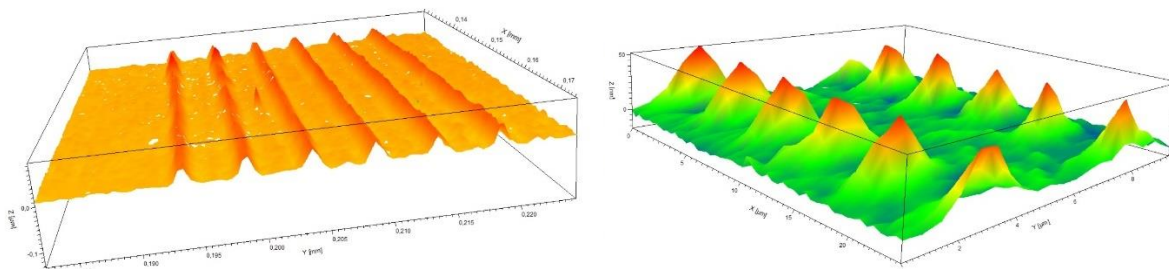


Рис. 5. Профилограмма записанного микрорельефа, снятая на интерференционном сканирующем микроскопе белого света WLI в режиме на отражение

Используя вычислительные функции программы интерференционного сканирующего микроскопа, определили ширину и высоту рельефа. Под действием сфокусированного лазерного излучения на пленку аморфного кремния при его переходе в кристаллическое состояние ширина дорожек составляет ~1 мкм, размер рельефа ~40 нм.

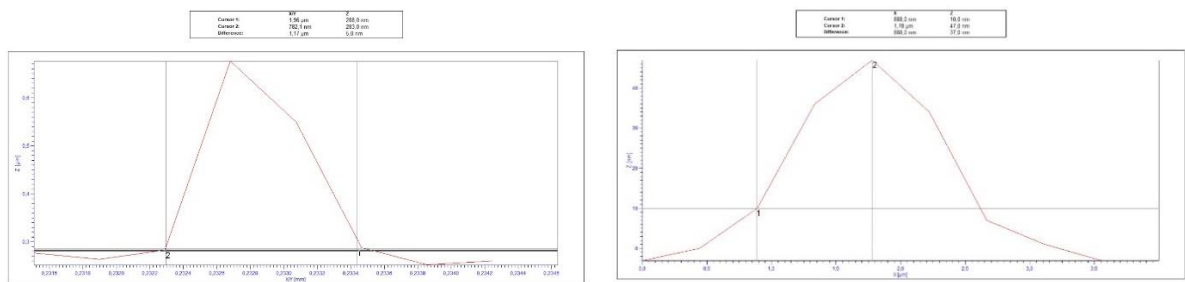


Рис. 6. График определения ширины дорожек и образовавшихся рельефов при переходе аморфного кремния в кристаллическую структуру

Заключение

Экспериментально продемонстрированы возможности полутонковой записи на плёнках а-Si излучением полупроводникового лазера с $\lambda = 405$ нм. Зафиксировано образование поверхностного рельефа под действием сфокусированного лазерного излучения на пленку аморфного кремния при его переходе в кристаллическое состояние. Измерения поверхностного рельефа проводилось на интерференционном сканирующем микроскопе белого света WLI. Нелинейная зависимость диаметра записываемого элемента на аморфном кремнии от энергии импульса лазера представляет возможность использовать тонкие пленки аморфного кремния для полутонковой записи микроструктур при изготовлении фотомасок и дифракционных оптических элементов.

Полутонковая прямая лазерная запись на тонких слоях а-Si позволяет проводить запись микроструктур с высоким разрешением для изготовления дифракционных оптических элементов.

Список источников

- [1] **Полещук, А. Г.** Микроструктурирование оптических поверхностей: технология и устройство прямой лазерной записи дифракционных структур / А. Г. Полещук, А. А. Кутанов, В. П. Бессмельцев, В. П. Корольков, Р. В. Шиманский, А. И. Малышев, А. Е. Маточкин, Н. В. Голошевский, К. В. Макаров, В. П. Макаров, И. А. Снимщиков, Н. Сыдык уулу // Автометрия. – 2010. – Т. 46. – №. 2. – С. 86-96.
- [2] **Сыдык уулу, Н.** Исследование прямой записи микрорельефа на двухслойной структуре а-Si/Ag / Н. Сыдык уулу, А. А. Кутанов, З. М. Казакбаева // Сборник международной конференции СибОптика-2021, Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей — Россия, Новосибирск : СГУГиТ. — 2021. — С. 229–235.
- [3] **Корольков, В. П.** Оптимизация оптического канала X-Y лазерного нанолитографа для записи на фото- и термочувствительных материалах / В. П. Корольков, А. Г. Седухин, А. Е. Качкин, А. Е. Елисафенко // Сборник международной конференции СибОптика-2019, Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей — Россия, Новосибирск : СГУГиТ. — 2019. — С. 28–33.

Direct recording of microstructures on amorphous silicon films by semiconductor laser radiation with $\lambda=405$ nm

A. A. Kutanov¹, V. P. Korolkov², N. Sydyk uulu¹, R. I. Kuts²

¹ Institute of Physics named after Academician Z. Z. Zheenbaev, National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyzstan

² Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

The absorption spectra of amorphous silicon thin films and the possibility of writing microstructures on them by radiation of a semiconductor laser with $\lambda=405$ nm have been investigated. The results of halftone direct laser recording of microstructures on amorphous silicon films with a line width of ~ 1 μm of laser radiation on a laser nanolithograph are presented. An increase in the film thickness on the irradiated areas of silicon films under the thermal action of laser radiation during the transition of amorphous silicon to a crystalline structure was recorded. Nonlinear dependence of the diameter of the recorded element on amorphous silicon films on the laser pulse energy makes it possible to write microstructures smaller than the wavelength in the manufacture of photomasks and diffractive optical elements

Keywords: Amorphous silicon, Direct laser writing, Optics, Holography, Diffractive optical elements.