

*Сыдык уулу Н., Кутанов А.А.***λ=405нм ЖАРЫМ ӨТКӨРГҮЧТҮҮ ЛАЗЕР МЕНЕН АМОΡФТУУ
КРЕМНИЙ ПЛЁНКАЛАРЫНА ЖАРЫМ ТОНДУК РЕЛЬЕФТИК ЖАЗУУ***Сыдык уулу Н., Кутанов А.А.***ПОЛУТОНОВАЯ РЕЛЬЕФНАЯ ЗАПИСЬ НА ПЛЕНКАХ АМОΡФНОГО
КРЕМНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРОМ С λ=405нм***Sydyk uulu N., A. Kutanov***HALF-TONE RELIEF RECORDING ON AMORPHOUS SILICON FILMS
BY A SEMICONDUCTOR LASER WITH λ=405nm**

УДК: 535.2; 621.373.826

λ=405нм жарым өткөргүчтүү лазердин фокустук нурлануусу аркылуу микроструктураларды магнетрондук чачыратуу жолу менен айнек субстратына чөккөн аморфтук кремнийдин жука пленкаларына түз жазуу изилденген. Аморфтук кремнийдин бир тектүү пленкасы аргон атмосферасында магнетронду чачыратуу жолу менен алынган жана алардын оптикалык абсорбация спектрлери ультрафиолет диапазонундагы спектрофотометрдин жардамы менен өлчөнгөн. Фокусталган лазер нурунун таасири астында аморфтук кремний катмарындагы аморфтук кремнийдин жука пленкаларына микротүзүмдөрдү түз лазердик жазууда локалдык кристаллдашуу пайда болот, бул жутуу коэффициентинин олуттуу төмөндөшүнө жана катмардын бетинде рельефтин пайда болушуна алып келет. Күчтүү туурасынан өтүүчү магнит талаасынын жардамы менен чачыратылган максаттуу беттин жанында плазманын локализациясынын эсебинен иондук токтуу тыгыздыгынын жогорулашы жогорку ылдамдыкта бирдей чачыратуу процессин камсыз кылууга мүмкүндүк берди. Бул процессин негизинде аморфтук кремнийдин калыңдыгы бирдей болгон бир тектүү пленкалар алынат. Аморфтуу кремний пленкаларынын жутуу спектрлерин өлчөөнүн жыйынтыктары 405 нм толкун узундугунда лазер менен α-Si катмарларына жазуу мүмкүнчүлүгүн көрсөттү. Аморфтук кремний пленкаларына түз лазердик жазуу боюнча эксперименталдык натыйжалар λ=405нм менен жарым өткөргүч лазерди колдонуунун артыкчылыгын көрсөттү. Жарым өткөргүч λ=405нм лазерди колдонуу менен жогорку резолюциядагы аморфтук кремний пленкаларына жарым тондук жазуунун мүмкүнчүлүктөрү лазердик нанолитографта эксперименталдык түрдө изилденген. Сзыктын туурасы ~1-2 мкм болгон аморфтук кремний пленкаларындагы микроструктураларды жарым тондук түз лазердик жазуунун натыйжалары алынды. Каттоочу катмардын ысытылышынын натыйжасында аморфтук кремнийдин кристаллдык түзүмүнө өтүшү учурунда фокусталган лазердик нурлануунун таасири астында α-Si пленкаларынын нурланган аймактарында ~200-250 нм рельефтин пайда болушу катталды. Жарым өткөргүч лазер менен аморфтук кремний пленкаларына жогорку резолюциядагы түз жарым тондук жазуу фотомаскаларды, микротүзүмдөрдү жана дифракциялык оптикалык элементтерди жасоо үчүн кызыгууну жаратат.

Негизги сөздөр: аморфтук кремний, түздөн-түз лазер жазуу, жарым өткөргүч лазер, оптика, дифракциялык оптикалык элементтер.

Исследована прямая запись микроструктур сфокусиро-

ванным излучением полупроводникового лазера с λ=405нм на тонкие пленки аморфного кремния, нанесенные на стеклянную подложку методом магнетронного распыления. Получены однородные пленки аморфного кремния методом магнетронного напыления в атмосфере аргона, и измерены их спектры оптического поглощения с использованием спектрофотометра в ультрафиолетовом диапазоне. При прямой лазерной записи микроструктур на тонких плёнках аморфного кремния в слое аморфного кремния под действием сфокусированного лазерного луча происходит локальная кристаллизация, которая приводит к значительному уменьшению коэффициента поглощения и формированию рельефа на поверхности слоя. Увеличение плотности ионного тока, за счет локализации плазмы вблизи распыляемой поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля, позволило обеспечить процесс равномерного распыления с высокой скоростью. На основе этого процесса получены однородные пленки аморфного кремния равномерные по толщине. Результаты измерения спектров поглощения пленок аморфного кремния показали возможности записи на слоях α-Si лазером на длине волны 405 нм. Экспериментальные результаты по прямой лазерной записи на пленках аморфного кремния показали преимущество использования полупроводникового лазера с λ=405нм. Экспериментально на лазерном нанолитографе исследованы возможности полутонковой записи на пленках аморфного кремния с высоким разрешением, с использованием полупроводникового лазера λ=405нм. Получены результаты полутонковой прямой лазерной записи микроструктур на пленках аморфного кремния с шириной линий ~1-2мкм. Зафиксировано образование рельефа ~200-250нм на облученных участках пленок α-Si под воздействием сфокусированного лазерного излучения при переходе аморфного кремния в кристаллическую структуру за счет нагрева регистрирующего слоя. Прямая полутонковая запись с высоким разрешением на пленках аморфного кремния полупроводниковым лазером представляет интерес для изготовления фотошаблонов, микроструктур и дифракционных оптических элементов.

Ключевые слова: аморфный кремний, прямая лазерная запись, полупроводниковый лазер, оптика, дифракционные оптические элементы.

Investigation of direct recording of microstructures by focused radiation of a semiconductor laser with λ=405nm on thin films of amorphous silicon deposited on a glass substrate by magnetron sputtering. Experimentally investigate the possibilities of half-tone recording on amorphous silicon films with high resolution on a laser nanolithography using a semiconductor laser with a wavelength of

405 nm. Amorphous silicon films were obtained by magnetron sputtering in an argon atmosphere, and their optical absorption spectra were measured using a spectrophotometer in the ultraviolet range. During direct laser recording of microstructures on thin films of amorphous silicon in an amorphous silicon layer under the interaction of a focused laser beam, local crystallization occurs, which leads to a significant decrease in the absorption coefficient and the formation of a relief on the layer surface. An increase in the ion current density, due to the localization of the plasma near the sputtered target surface under the action of a strong transverse magnetic field, made it possible to ensure the process of uniform sputtering at a high speed. On the basis of this process, homogeneous films of amorphous silicon are obtained, uniform in thickness. Based on the results of measurements of the absorption spectra, the possibility of recording on a-Si layers by a laser with a wavelength of 405 nm was determined. Experimental results on direct laser recording on amorphous silicon films showed the advantage of using a semiconductor laser with $\lambda=405\text{nm}$. The results of half-tone direct laser writing of microstructures on amorphous silicon films with a line width of $\sim 1\text{-}2\ \mu\text{m}$ are obtained. The formation of a relief of $\sim 200\text{-}250\ \text{nm}$ in the irradiated regions of a-Si films under the action of focused laser radiation during the transition of amorphous silicon into a crystalline structure due to heating of the recording layer was recorded. High-resolution direct half-tone recording on amorphous silicon films by a semiconductor laser is of interest for the fabrication of photomasks, microstructures, and diffractive optical elements.

Key words: amorphous silicon, direct laser recording, semiconductor laser, optics, diffraction optical elements.

Введение. Прямая лазерная запись на пленках аморфного кремния без мокрой химической обработки является перспективной для высокоразрешающей записи фотошаблонов, микроструктур и дифракционных оптических элементов [1,2]. На лазерной круговой системе [3] в работах [4,5] были исследованы возможности записи на аморфном кремнии для длин волн (476-488-514нм), и показаны возможности получения на пленках a-Si при записи сфокусированным лазерным лучом пространственного разрешения, значительно превышающего разрешение оптической системы. Высокое пространственное разрешение записи дорожек на аморфном кремнии (около 1200 мм-1) было получено в работе [5] при скорости сканирования пучка около 100 мкм/с. Ранее, прямая лазерная запись на пленках аморфного кремния исследовалась с использованием твердотельного лазера с диодной накачкой DPSS ($\lambda=355\text{nm}$) [1]. Однако, использованный твердотельный лазер с диодной накачкой DPSS ($\lambda=355\text{nm}$) не отвечал требованиям компактности, надежности и стоимости для построения лазерной записывающей системы (ЛЗС).

В последние годы полупроводниковые лазеры бурно развиваются, вытесняя с рынка во многих применениях другие типы лазеров. Преимущество полупроводниковых лазеров: прямая накачка электрическим током; компактные размеры; более низкая стоимость. Сине-фиолетовые полупроводниковые лазеры (длина волны – 405нм) первоначально были разработаны и предназначены для оптических накопителей с функцией записи дисков Blu-Ray Disc (BD) [6]. С

появлением на рынке недорогих полупроводниковых лазеров ($\lambda=405\text{nm}$) позволило расширить спектр их применений. Так, с использованием лазерных диодов (LD) с длиной волны 405нм разработан метод кристаллизации для пленки аморфного кремния (a-Si), предлагаемый для изготовления микрокристаллических (μc)-Si TFT с нижним затвором (BG) [7]. Сверхбыстрая лазерно-индуцированная кристаллизация пленки аморфного кремния толщиной 100нм была исследована в работе [8]. Импульсная лазерная кристаллизация тонкого полупроводника пленки на аморфных подложках находят широкое применение в производстве тонкопленочных транзисторов TFT для жидкокристаллических дисплеев с активной матрицей высокой четкости AMLCD [9]. Многомасштабная лазерная прямая запись проводящих металлических микроструктур с помощью полупроводникового лазера $\lambda=405\text{nm}$ исследована в работе [10].

Применение аморфного кремния для тонкопленочных солнечных элементов описано в работе [11, 12]. Один из факторов, снижающих эффективность солнечных элементов (СЭ) – отражение части солнечного света от поверхности элемента. Для уменьшения отражения применяют осаждение антиотражающих покрытий на поверхность СЭ [12,13], структурирование поверхности СЭ массивом микропирамидок [12], наклеивание на поверхность СЭ особым образом структурированных полимерных пленок [12]. В работе [14] описано применение антиотражающих покрытий на основе субволновых решеток с периодом около половины длины волны света. Прямая полутонковая запись на пленках аморфного кремния полупроводниковым лазером с высоким разрешением представляет интерес для изготовления фотошаблонов, микроструктур и дифракционных оптических элементов [15, 16].

В данной работе исследованы возможности полутонковой прямой лазерной записи микроструктур на пленках a-Si излучением полупроводникового лазера с $\lambda=405\text{nm}$ с высоким разрешением.

1. Эффективность использования энергии лазерного излучения при записи на пленке a-Si для нескольких длин волн. Для создания многофункциональных скоростных записывающих лазерных систем (СЗЛС) важно выбрать регистрирующую среду и оптимальный лазер. Для решения этой задачи требуется определить, когда энергия лазерного излучения наиболее эффективно поглощается в регистрирующем материале. С этой целью исследованы спектры поглощения тонких пленок a-Si нанесенных на стеклянную подложку методом магнетронного напыления.

На двухлучевом спектрофотометре (PYE UNICAM 100) измерены спектры поглощения в тонких пленках a-Si. Оптическая схема спектрофотометра показана на рисунке 1.

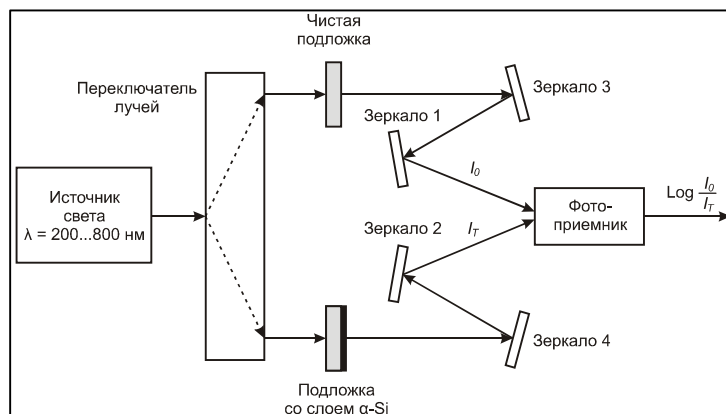


Рис. 1. Схема для измерения спектров поглощения.

Схема для измерения спектра поглощения стеклянной подложки идентична схеме на рисунке 1, с той лишь разницей, что одна чистая подложка помещена в предметный канал спектрофотометра. Спектр поглощения чистой подложки толщиной 1,25 мм показан на рисунке 2.

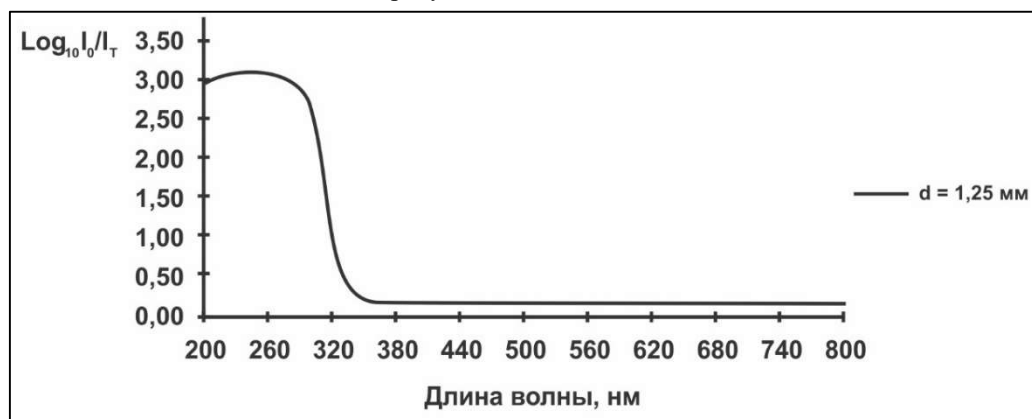


Рис. 2. Спектр поглощения стеклянной подложки.

Видно, что поглощение света в стеклянной подложке существенно возрастает на длинах волн менее 340 нм, в то время как в диапазоне 360...800 нм оно практически постоянно и составляет около 31%.

Для измерения спектров отражения на тонких пленках α -Si использовалась аналогичная схема двухлучевого спектрофотометра как на рисунке 1, с разницей, что в этой схеме исследуемый образец помещали в предметный канал спектрофотометра на место зеркала №2 так, чтобы луч, поступающий от зеркала №4, отражался от слоя α -Si и попадал в фотоприемник. А чистая подложка убиралась из верхнего левого канала двухлучевого спектрофотометра. Ввиду того, что оптическая схема спектрофотометра симметрична, от зеркала №4 поступает луч той же интенсивности, что и от зеркала №3. Тогда можно считать, что измеряется отношение интенсивностей падающего луча (I_0) к интенсивности отраженного (I_R)

$$K_R = \log \frac{I_0}{I_R}$$

Измерения показали, что отражение света минимально в области длин волн 580...640 нм.

Величина поглощения и отражения света в слое α -Si зависит от длины волны падающего лазера. С учетом потерь на отражение от слоя α -Si интенсивность света, входящего в слой, составляет $(I_0 - I_R)$, где I_0 – интенсивность падающего на слой света, а I_R – интенсивность отраженного света. Отношение

$$\frac{I_0 - I_R}{I_T}$$

где I_T – интенсивность света, прошедшего сквозь слой, характеризует поглощение энергии падающего лазера в слое α -Si. На основе измеренных спектров K_T и K_R построим зависимость поглощения энергии в логарифмическом масштабе

$$\log_{10} \left(\frac{I_0 - I_R}{I_T} \right) = \log_{10} (10^{K_T} - 10^{K_T - K_R})$$

На рисунке 3 показана такая зависимость для слоя α -Si толщиной 1 мкм. Видно, что максимум

поглощения энергии лазера наблюдается на длине волны 360 нм.

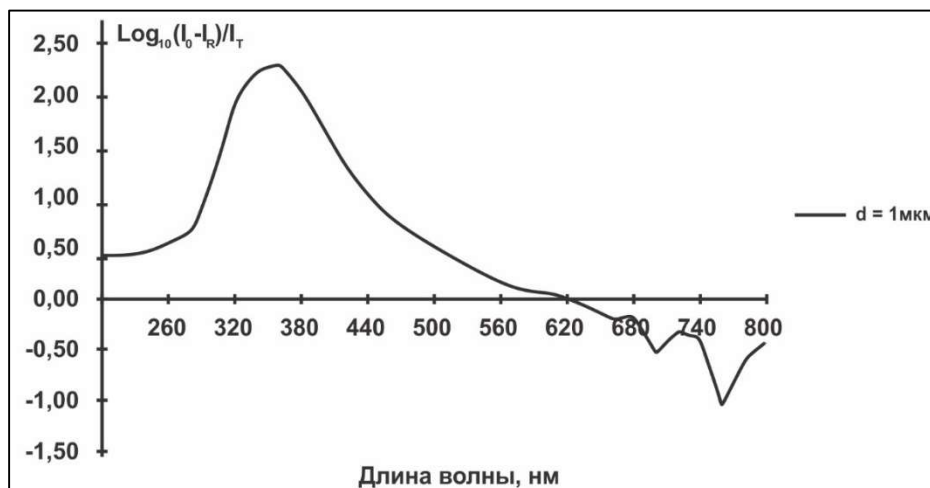


Рис. 3. Поглощение энергии пищевого лазера в слое α -Si толщиной 1 мкм.

В таблице приведены ожидаемые значения эффективности использования энергии записи для лазеров с типичными длинами волн.

Длина волны пищевого лазера			
266 нм	355 нм	405 нм	532 нм
68 %	99 %	97 %	46 %

Для записи на слоях α -Si наиболее предпочтительны лазеры с длиной волны 355 нм и 405 нм.

Ввиду того, что поглощение в стеклянной подложке резко возрастает на длинах волн ниже 305 нм, запись и считывание способом «сквозь подложку» в этом диапазоне нецелесообразны.

2. Локальное тепловое воздействие лазерным излучением на пленки аморфного кремния. В связи с появлением на рынке одномодовых полупроводниковых лазеров ($\lambda=405$ нм), имеющих достаточно высокую мощность излучения, исследование прямой лазерной записи на пленках α -кремния данными лазерами имеет практический интерес.

Основными достоинствами формирования рисунка фотошаблонов прямым лазерным методом в неорганических материалах, таких как пленки аморфного кремния являются: сокращение количества операций, сэкономить ресурсы; возможность нанесения пленок на любую большую или криволинейную поверхность; увеличение точности изготовления шаблона; пространственное разрешение до 2000 нм-1; возможность управления процессом записи и выбора мощности по изменению отражения пленки; пороговый эффект: возможность работы на свету; возможность применения обычной фокусирующей оптики; небольшой динамический диапазон изменения мощности при больших изменениях скорости движения

экспонирующего пятна излучения.

Для прямой лазерной литографии в нашей время используется ряд типов оборудования. Так, например, 2х и 3х координатные столы с управлением от компьютера. В нашем случае была использована установка с прецизионной 2х координатной системой. Система двух-координатного перемещения обеспечивалась цифровым контроллером, контролирующего перемещение стола. Контроллер разработан для управления линейных перемещений стола и синхронизации двигателей.

В исследование для прямого лазерного воздействия на аморфный кремний использовался полупроводниковый одномодовый Blu-Ray лазер с длиной волны 405 нм мощностью 120 мВт. С целью измерения длины когерентности для излучения полупроводникового лазера ($\lambda=405$ нм) использовалась схема интерферометра Майкельсона. Измерения длины когерентности лазерного излучения показало, что она составляет несколько миллиметров (3-4 мм). Также, когерентность лазера зависит от выходной мощности излучения.

При увеличении мощности (тока) излучения лазера происходит ухудшение когерентности излучения полупроводникового лазера $\lambda=405$ нм. Для визуальной демонстрации получения интерференционной картины от излучения полупроводникового «блюрей» лазера, использовалась плоскопараллельная пластина.

В оптической схеме записи лазерный луч колировался с помощью асферической линзы, а затем он фокусировался микрообъективом на носитель записи для получения микроструктур с высоким разрешением. Частота и их длительность лазерных импульсов контролировалась от генератора импульсов. Эксперименты по лазерной записи проводились на пленках аморфного кремния толщиной $\sim 1-2$ мкм, полученных методом магнетронного нанесения.

На рисунке 4 приведена последовательность

записанных микроструктур, снятая на оптическом микроскопе Микро 201-01 в проходящем белом свете на пленки a-Si. При записи регистрирующий слой непрерывно перемещается с помощью 2D позиционирующего устройства, а серия импульсов лазера записывает последовательность микроструктур. На микрофотографии видно локальное просветление в местах импульсного лазерного воздействия на пленку аморфного кремния. Локальное просветление пленки зависит от мощности пучка и скорости записи.

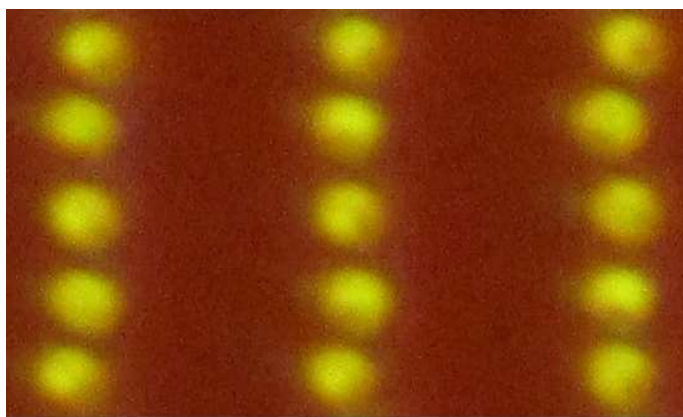


Рис. 4. Фотографии записанных микроструктур на плёнке a-Si, снятые в проходящем свете.

Фокусированное воздействие на пленку импульсным лазерным излучением наносекундной длительности вызывает нагрев в слое пленки, на основе которого изменяется структура пленки. При малой мощности слой пленки не изменится, а при высокой мощности лазера слой пленки будет испаряться, поэтому надо подобрать необходимую мощность лазера. Из-за необходимой мощности лазера запись на пленочный слой аморфного кремния переходит из неупорядоченного аморфного состояния в кристаллическое. Переход к упорядоченному расположению атомов аморфного кремния в слое пленки приводит к локальному увеличению объема (рис. 5).

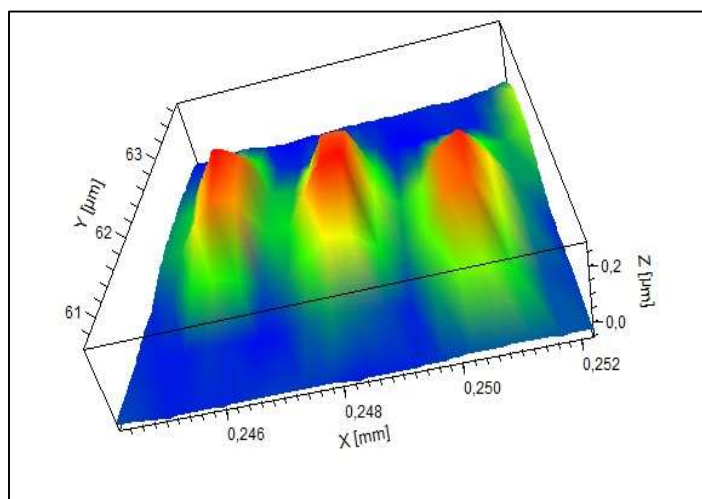


Рис. 5. Объемный рост рельефа кристаллического кремния после локального лазерного воздействия.

На основе серии экспериментов по сфокусированной лазерной записи на пленках аморфного кремния установлено, что рельеф при переходе из аморфного состояния в кристаллическое увеличивается до $\sim 200-250$ нм, а ширины дорожек составляет до $\sim 1-2$ мкм (рис. 6).

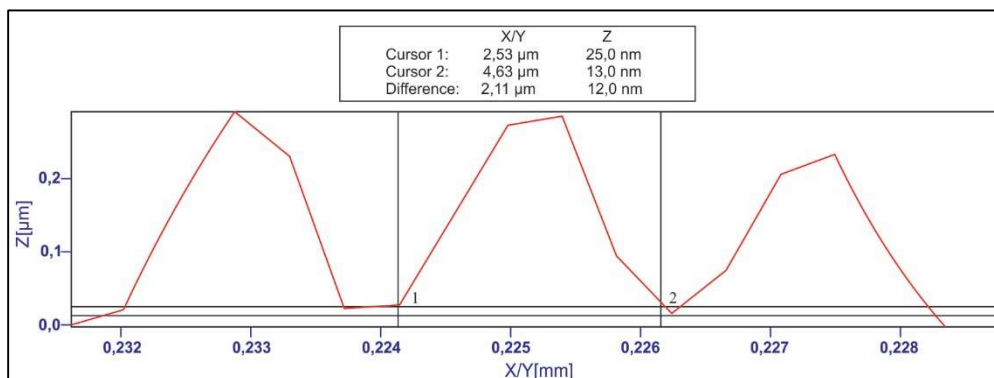


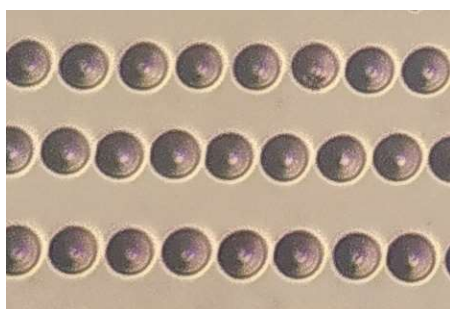
Рис. 6. График определения ширины дорожек и образовавшегося рельефа при переходе аморфного кремния в кристаллическую структуру.

Недостатком одномодового полупроводникового лазера, использованного в экспериментах, была малая длина когерентности и ее зависимость от мощности излучения. В связи с этим, было трудно записать Blu-ray лазером точечные голограммы для изготовления мастер матрицы для производства тисненых радужных голограмм. Необходимо будет использовать Blu-ray лазер с большей длиной когерентности. В последующем, представляет практический интерес продолжить исследования по прямой лазерной записи на пленках аморфного кремния с целью создания голографической дот матрицы принтера на основе полупроводникового лазера $\lambda=405\text{nm}$, на основе ранее запатентованного устройства записи дифракционных элементов [2].

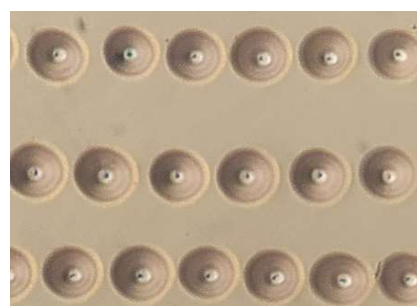
3. Анализ структуры и морфологии пленки аморфного кремния после локального теплового

воздействия лазером. Пленки аморфного кремния полученные методом магнетронного нанесения подвергали комплексному исследованию: в сканирующем электронном микроскопе BS-300 проводилось исследование морфологии поверхности и измерение толщины; на рентгеновском дифрактометре определение структурных параметров (для пленок толщиной более 1 мкм) с электронной записью результатов; исследования записанных микроструктур в оптическом микроскопе (Микро 201-01).

Исследования по изменению рельефа поверхности пленок кремния под действием лазерного облучения первоначально проводили на оптическом микроскопе Микро 201-01. Фотографии микроструктур, записанных на пленке аморфного кремния одномодовым «блю рэй» лазером приведены на рисунке 7.



Частота импульсов 800 Гц
Увеличение X100



Частота импульсов 800 Гц
Увеличение x200

Рис. 7. Микроструктуры на пленке аморфного кремния, записанные одномодовым «блю рэй» лазером.

В эксперименте было выявлено, что чем выше частота импульсов лазерного излучения, тем меньше расстояние между дифракционными элементами на исследованных образцах с a-Si. Плотность записи энергии на слою аморфного кремния составила $(0.2-0.4) \times 10^5 \text{ Дж/см}^2$.

Данные рентгеноструктурного анализа показывают, что на свободной от дифракционных элементов поверхности структура пленки состоит из аморфной фазы без следов кристаллизации. На дифрактограмме,

полученной с поверхности, где производилась запись дифракционных элементов, кроме аморфной фазы, выявляется фаза кристаллического кремния. Кристаллографическая плоскость роста является характерной плоскостью роста для монокристаллического кремния.

Заключение. Измерение спектров оптического поглощения с использованием спектрофотометра в ультрафиолетовом диапазоне пленок a-Si показало, что для прямой лазерной записи на пленках аморфно-

го кремния наиболее эффективно использовать лазеры с длиной волны 355 и 405 нм. Из результатов проведенных исследований следует, что на поверхности пленок аморфного кремния протекают сложные структурные и морфологические изменения. В результате локального воздействия лазерного пучка происходит изменение структуры пленки за счет теплового нагрева на поверхности аморфного кремния. При таком переходе из неупорядоченной аморфной фазы кремний переходит в упорядоченную структуру. Переход к упорядоченному расположению атомов приводит к локальному увеличению объема. Измерение записанного рельефа показывает, что при взаимодействии лазерного излучения на пленку аморфного кремния формируется рельеф высотой ~200-250 нм. Индуцированное сфокусированным излучением полупроводникового лазера $\lambda=405$ нм осветление пленки позволяет проводить прямую позитивную запись топологии фотошаблонов. Прямая полутонная запись на пленках аморфного кремния полупроводниковым лазером $\lambda=405$ нм с высоким разрешением представляет интерес для изготовления фотошаблонов, микроструктур и дифракционных оптических элементов.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что лазерный метод безрезистного формирования масок на аморфных кремниевых пленках, представляют собой перспективный, гибкий инструмент для создания амплитудных дифракционных структур с высоким пространственным разрешением.

Литература:

1. Поleshchuk A.G., Kutanov A.A. и др. Микроструктурирование оптических поверхностей: технология и устройство прямой лазерной записи дифракционных структур. // *Автометрия*. 2010. Т. 46. №2 С. 86-96. Poleshchuk A. G., Kutanov A.A. et al. Microstructuring of Optical Surfaces: Technology and Device for Direct Laser Writing of Diffractive Structures // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2010, Vol. 46, No. 2, pp. 171-180. DOI: 10.3103/S8756699010020093
2. Кутанов А.А., Снимщиков И.А., Макаров К.В., Сыдык улуу Н. Оптическая система записи дифракционных элементов. // *Известия ВУЗов, г. Бишкек №3-4, 2007.* - С 8-11.
3. Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al. Polar Coordinate Laser Pattern Generator for Fabrication of Diffractive Optical Elements with Arbitrary Structure // *Applied Optics*. 1999. V. 38 № 8. P 1295-1301. <https://doi.org/10.1364/AO.38.001295>
4. Корольков В.П., Чернухин В.П. Оптическая запись на пленках аморфного кремния с субмикронным разрешением // *Журнал технической физики*. 1989. Т. 59. № 6. С.131-133.
5. Gotchiyev V.Z., Korolkov V.P., Sokolov A.P., Chernukhin V.P. High resolution optical recording on a-Si films // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1991. V. 137-138. № 2. P. 1297-1300. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(05\)80361-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(05)80361-8)
6. White Paper Blu-ray Disc Format. Blu-ray Disc Association. December 2012.
7. Morimoto K., Suzuki N., Yamanaka K., Yuri M., Milliez J., Xinbing Liu. An Advanced 405-nm Laser Diode Crystallization Method of a-Si Film for Fabricating Microcrystalline-Si TFTs. // *IEICE Transactions on Electronics*. 2011. V. 94-C. № 11. P. 1733-1738. <https://doi.org/10.1587/transele.E94.C.1733>
8. Choi Tae Y., Hwang David J., Grigoropoulos Costas P. Ultrafast laser-induced crystallization of amorphous silicon films // *Optical Engineering*. 2003 V.42. №11. P. 3383-3388. <https://doi.org/10.1117/1.1617312>
9. M. Lee, S. Moon, M. Hatano, and C. P. Grigoropoulos. Ultralarge lateral grain growth by double laser recrystallization of a-Si films // *Appl. Phys.* 2001. V.73. №3. P. 317-322. <https://doi.org/10.1007/s003390100874>
10. T. Komori, T. Furukawa, M. Iijima, S. Mario. Multi-scale laser direct writing of conductive metal microstructures using a 405-nm blue laser // *Optics Express*. 2020. V. 28. № 6. P. 8363-8370. <https://doi.org/10.1364/OE.388593>
11. Гременок В.Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В.Ф. Гременок, М.С. Тиванов, В.Б. Залесский. – Минск: Изд. центр БГУ, 2007. 222 с. ил., табл. – ISBN 985-476-443-5.
12. Meier, J., Spitznagel, J., et al. Potential of amorphous and microcrystalline silicon solar cells // *Thin Solid Films*. 2004. V. 451-452. P. 518-524. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.11.014>
13. Фонаш С., Ротворф А., Казмерски Л. и др. Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики / под ред. Коутса Т., Микина Дж. М.: Мир, 1988. 307 с.
14. Schopf R.E., Hultsch T., Lotz J., Brautigam M., Gombert A., Rose K., Heinzel A., Horbelt W., Zanke, C. Blasi B., Wittwer V. Antireflective submicrometer surface-relief gratings for solar applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1998. V. 54. №1. P. 333-342. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(98\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(98)00084-1)
15. Корольков В.П., Седухин А.Г., Качкин А.Е., Елисафенко А.Е. Оптимизация оптического канала X-Y лазерного нанолитографа для записи на фото- и термочувствительных материалах. // *Сборник международной конференции СибОптика-2019, Актуальные вопросы высокотехнологических отраслей.* - Россия, Новосибирск: СГУГиТ, 2019. С. 28-33.
16. Сыдык улуу Н., Кутанов А.А. Казакбаева З.М. Исследование прямой записи микрорельефа на двухслойной структуре a-Si/Ag. // *Сборник международной конференции СибОптика-2021, Актуальные вопросы высокотехнологических отраслей.* – Россия, Новосибирск: СГУГиТ, 2021. С. 229-235.
17. Токтогонов С.А., Мурзакулова И.Ч., Осмоналиева А.А. Лазерно-электроэрозивное действие на кремниевые пластины. *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2017. №. 5. С. 17-21.