

УДК 681.7; 535.211; 535.417

МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ: ТЕХНОЛОГИЯ И УСТРОЙСТВО ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР*

А. Г. Полещук¹, А. А. Кутанов², В. П. Бесмельцев¹,
В. П. Корольков¹, Р. В. Шиманский¹, А. И. Малышев¹,
А. Е. Маточкин¹, Н. В. Голошевский¹, К. В. Макаров²,
В. П. Макаров², И. А. Снимщиков², Н. Сыдык уулу²

¹ Учреждение Российской академии наук

Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

E-mail: poleshchuk@iae.nsk.su

² Институт физико-технических проблем и материаловедения

Национальной академии наук Кыргызской республики,
700027, г. Бишкек, просп. Чуй, 265а

Представлены результаты разработки и тестирования сканирующей системы интерференционной литографии, предназначенной для формирования дифракционных микроструктур, состоящих из микрорешёток размером 5–10 мкм с заданной ориентацией и периодом в диапазоне 0,6–1,5 мкм. Общее поле записи системы составляет 300 × 300 мм. Система использовалась для исследования прямой лазерной записи микрорешёток на плёнках хрома и аморфного кремния, нанесённых методом магнетронного распыления на поверхность стеклянных подложек. Разработанные установка и технологии прямой записи микрорешёток могут применяться в дальнейшем для формирования просветляющих субволновых покрытий оптических элементов, графических микроструктурированных марок для защиты продукции, а также для изготовления дифракционных аттенуаторов лазерного излучения.

Ключевые слова: сканирующая интерференционная литография, прямая лазерная запись, дифракционные микроструктуры, плёнки хрома, плёнки кремния.

Введение. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) предоставляют новые возможности для улучшения качества изображения, сокращения числа компонентов в оптической системе, снижения цены и веса прибора. ДОЭ обычно изготавливаются с помощью прецизионных электронно-лучевых или лазерных устройств записи [1, 2]. Точность формирования элемента может достигать нескольких нанометров. Такие устройства сложны и дороги. При этом скорость записи элементов с их помощью невысока. Однако существует ряд областей применения ДОЭ, где от устройства записи требуются высокое пространственное разрешение и большая скорость записи, при этом точность формирования структуры может быть относительно низкой. Один из примеров простых дифракционных структур массового применения — это антиотражающие покрытия на основе субволновых решёток [3] с периодом около половины длины волны света. Такие структуры обычно формируются голографическим (или интерференционным) методом путём регистрации интерференционной картины в слое фоторезиста, нанесённого на просветляемую поверхность [4], и последующего ионного травления. Для устранения поляризационных эффектов, как правило, необходима более сложная, двумерная, картина, что требует применения

*Работа выполнена при поддержке Сибирского отделения РАН (комплексный интеграционный проект № 54), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-02-01065-а), частичной поддержке НАТО (грант SfP N 973702).

схем с многолучевой интерференцией. Также серьезной проблемой является выравнивание величины экспозиции по всей интерференционной картине. В этой связи данный метод создания антиотражающих покрытий пока не нашёл широкого практического применения в оптике видимого и УФ-диапазонов. Использование скоростных сканирующих систем интерференционной литографии (СИЛ) [5], формирующих дифракционные структуры путём последовательной записи небольших фрагментов или ячеек, позволит решить проблему нанесения дифракционных антиотражающих покрытий на поверхности компонентов больших размеров. К ним относятся фотоэлементы солнечных батарей, а также оптические элементы, антиотражающие покрытия на которые сложно или невозможно выполнить классическим методом напыления многослойного покрытия [6], например силовая лазерная оптика, бинарные дифракционные элементы и т. п. СИЛ также могут использоваться для изготовления матриц радужных голограмм. Микроструктурирование поверхности с помощью СИЛ осуществляется путём последовательной записи микрорешёток, сформированных регистрацией в светочувствительном материале картины интерференции двух когерентных сфокусированных лазерных пучков. При этом размер решёток задаётся, как правило, в диапазоне от единиц до десятков микрометров. Такой метод записи получил название «интерференционная литография» [7, 8] и активно разрабатывается в настоящее время.

Цель данной работы — представить результаты создания и работы СИЛ для записи дифракционных элементов и изображений, состоящих из элементарных микроструктур (микрорешёток) с произвольной ориентацией и периодом порядка 0,6–1,5 мкм, и предварительные результаты исследования методов прямой лазерной записи с помощью СИЛ на тонких плёнках хрома и аморфного кремния.

Лазерная система записи. В предлагаемой СИЛ применён известный параллельно-последовательный метод записи [9]. Интерференционная картина создаётся в фокальной плоскости микрообъектива в ограниченной области пересечения двух сфокусированных пучков света, как показано на рис. 1, *a, b*, т. е. за одну экспозицию формируется пятно (далее ячейка) с интерференционной картиной. Перемещая по двум координатам фотоувствительную поверхность (подложку), можно сформировать достаточно протяжённую область (рис. 1, *c*). В данном методе скорость записи определяется компромиссом между размером элементарной ячейки и скоростью перемещения подложки.

Каждая ячейка задаётся тремя параметрами. Первый параметр — это период полос s интерференционной картины (период штрихов), заполняющей ячейку, который зависит от угла пересечения когерентных лазерных пучков α :

$$2 \sin(\alpha/2) = \lambda/s, \quad (1)$$

где λ — длина волны экспонирующего излучения лазера. Расстояние l между входными лазерными пучками (см. рис. 1, *b*) должно быть

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

(здесь f — фокусное расстояние микрообъектива).

Вторым важным параметром элементарной ячейки является её диаметр D , который определяется диаметром входного лазерного пучка d :

$$D = 2,44\lambda f/d. \quad (3)$$

Третий параметр — угол ориентации решётки θ — формируется направлением входящих симметричных лазерных пучков.

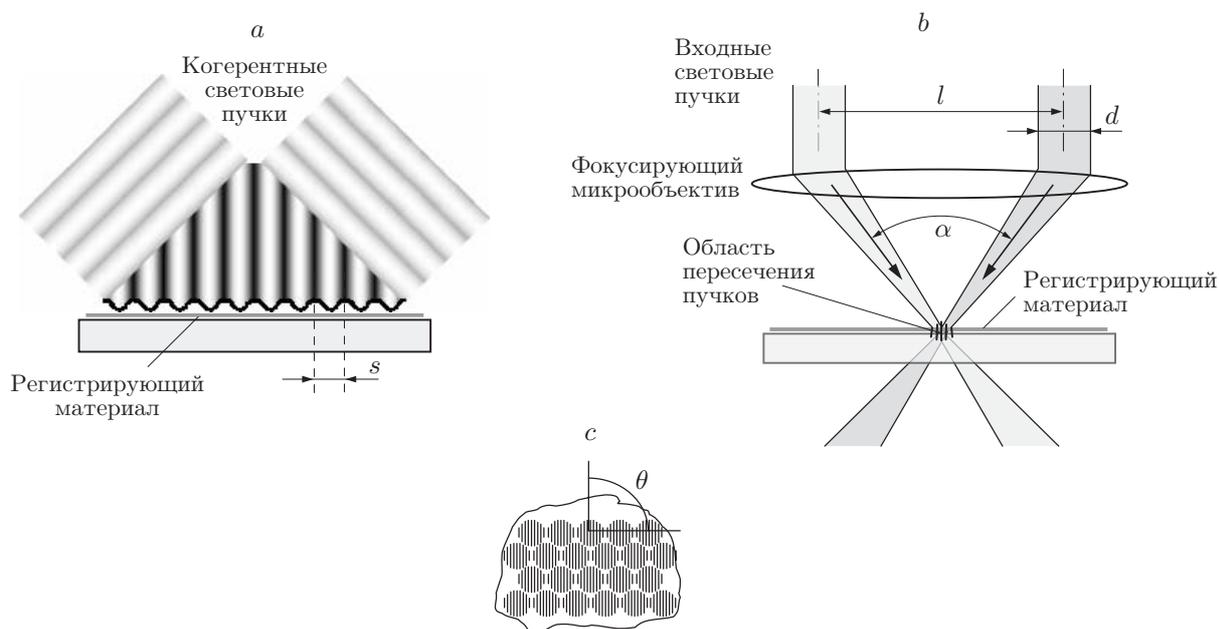


Рис. 1. Формирование периодической структуры двумя когерентными пучками

Из выражений (2) и (3) следует, что на числовую апертуру фокусирующего микрообъектива накладывается следующее условие:

$$NA \geq \sin[\arctg((l + d)/2f)].$$

Основные конструктивные параметры СИЛ в зависимости от заданных параметров ячейки приведены в таблице. Из таблицы видно, что при выполнении записи лазером с длиной волны 355 нм довольно просто формируются структуры с периодом до 0,4 мкм, а при использовании более коротковолнового лазера период структуры может быть доведён до $s = 0,28$ мкм.

Для обеспечения высокой скорости записи длительность импульсов экспонирующего излучения должна быть достаточно короткой:

$$\tau < 0,1s/v, \quad (4)$$

где v — скорость перемещения регистрирующего материала относительно области пересечения пучков. При $s = 0,6$ мкм и $v = 0,5$ м/с время экспозиции не должно превышать 100 нс.

Параметры СИЛ	Ячейка		
	$s = 0,60$ мкм, $D = 8$ мкм	$s = 0,40$ мкм, $D = 6$ мкм	$s = 0,28$ мкм, $D = 4$ мкм
NA	0,36	0,56	0,62
f , мм	8	4	4
λ , нм	355	355	266
l , мм	5,2	4,8	5,8
d , мм	0,86	0,56	0,65

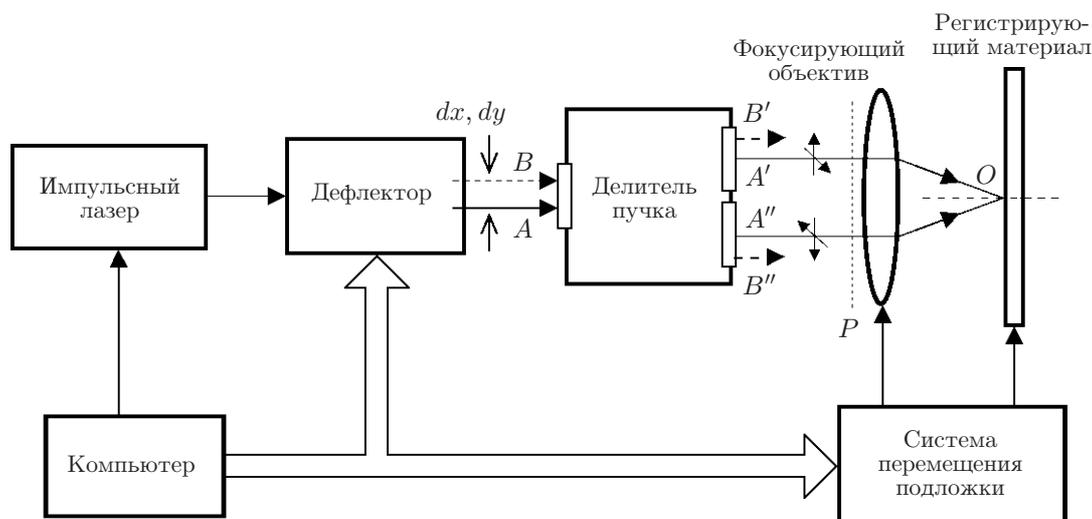


Рис. 2. Схема системы интерференционной литографии

Блок-схема разработанной СИЛ [10] для записи ячеек дифракционных микроструктур приведена на рис. 2. Каждая ячейка содержит линейную решётку с периодом s и углом ориентации θ , задаваемыми управляющим компьютером. При использовании достаточно мощного импульсного лазера (например, Q-switch) СИЛ позволяет производить прямую запись методами абляции (испарения) или термохимии.

Быстродействующий дефлектор смещает лазерный пучок параллельно по двум координатам x и y (на рис. 2 показаны два положения: A и B). Установленный последовательно с дефлектором делитель пучка формирует два коллинеарных лазерных пучка: прямой и зеркально ориентированный (например, A' и A''). Далее эти пучки поступают к микрообъективу и фокусируются в плоскости регистрирующей среды, образуя интерференционную решётку. Согласование скорости переключения дефлектора и частоты генерации импульсов лазера позволяет задавать собственную ориентацию и период для каждой интерференционной решётки.

На рис. 3, a — c показаны различные положения пучков света A' и A'' во входной плоскости фокусирующего объектива и соответствующие интерференционные решётки в плоскости регистрирующей среды (рис. 3, d — f). В исходном состоянии пучок света A' проходит через линию пересечения квадрантов I и II на расстоянии y_1 от оптической оси (см. рис. 3, a). Зеркальный пучок A'' в исходном состоянии лежит на пересечении квадрантов III и IV на расстоянии $-y_1$ от оптической оси. Интерференционная картина имеет вид решётки (см. рис. 3, d). При подаче на дефлектор управляющих сигналов пучки A' и A'' перемещаются, как показано на рис. 3, b, c . При этом изменяется период (см. рис. 3, e) или угол наклона $\theta = \arctg(x_1/y_1)$ (см. рис. 3, f) интерференционной решётки.

Оптический канал записи СИЛ. Схема оптического канала записи СИЛ приведена на рис. 4. Пучок света (диаметром d_1) от лазера поступает на вход узла смещения пучка, который состоит из линзы O_2 и двух зеркальных дефлекторов M_1 и M_2 , установленных по обе стороны точки фокусировки S . Расстояние между линзами O_1 и O_2 вдоль оптической оси выбрано таким образом, что световой пучок A на выходе линзы O_2 становится коллимированным. Зеркало дефлектора M_1 установлено перед точкой S на расстоянии l_1 , а M_2 — с другой стороны на расстоянии l_2 . Под действием управляющих электрических сигналов U_y и U_x зеркала дефлекторов M_1 и M_2 поворачиваются на углы φ_y и φ_x и отклоняют световой пучок вдоль осей OY и OX соответственно. Электрические сигналы подаются от блока управления. Линза O_2 преобразует угловое отклонение пучка света в

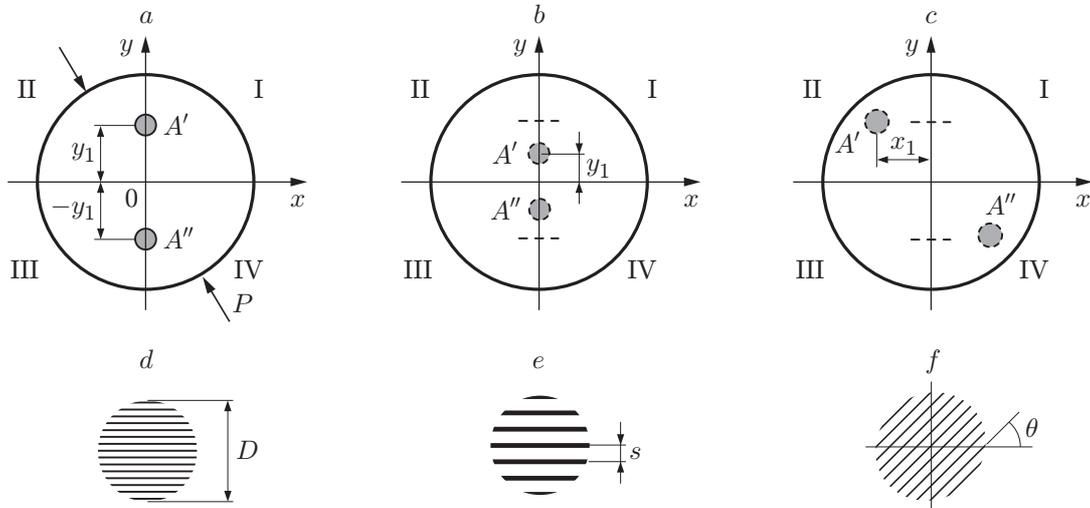


Рис. 3. Управление параметрами микрорешёток: положения пучков A' и A'' во входной плоскости микрообъектива (a—c) и соответствующие решётки в плоскости фоточувствительной среды (d—f)

его линейное смещение вдоль осей координат X и Y на величины

$$x_1 = 2\varphi_x f_2; \quad y_1 = 2\varphi_y f_2, \tag{5}$$

где f_2 — фокусное расстояние объектива O_2 .

С выхода узла смещения пучка свет поступает на вход светоделителя, выполненного на основе модифицированной призмы Порро [11], которая в отличие от классической содержит дополнительную призму со светоделительной поверхностью, склеенную с диагональной гранью призмы Порро. Световой пучок A делится на два приблизительно равных пучка. Первый, прямой, пучок A' проходит призму без изменения направления. Второй пучок A'' испытывает четыре отражения (два вдоль оси OX и два вдоль оси OY) от граней модифицированной призмы Порро и выходит зеркально ориентированным по отношению к первому пучку. Оптические оси прямого и зеркального пучков света коллинеарны

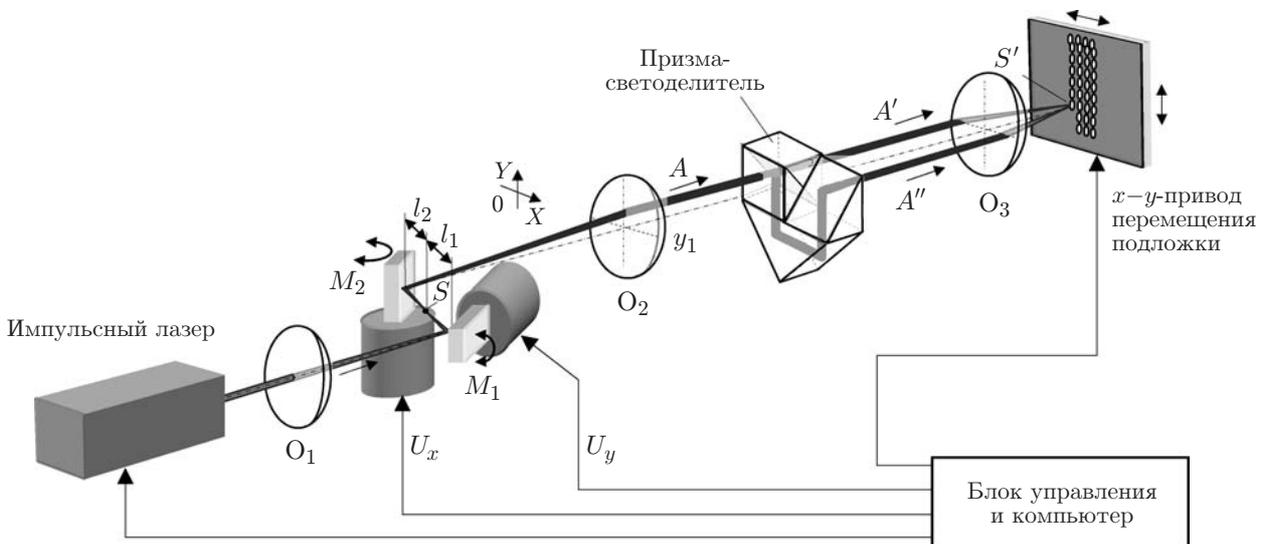


Рис. 4. Упрощённая оптическая схема канала записи системы интерференционной литографии

относительно оптической оси микрообъектива O_3 . Далее пучки A' и A'' фокусируются микрообъективом O_3 в плоскости регистрирующей среды. В результате интерференции двух сфокусированных пучков света в плоскости регистрирующего материала формируется синусоидальная интерференционная картина, фиксируемая им в виде локального изменения оптических или химических свойств или даже поверхностного микрорельефа при достаточно высокой интенсивности излучения. Регистрирующая среда с помощью системы сканирования перемещается относительно области фокусировки S' . Частота следования импульсов лазера задаётся расстоянием L между соседними решётками:

$$f_{\text{las}} = v/L. \quad (6)$$

Например, при $L = 10$ мкм и $v = 0,3$ м/с (максимальная скорость сканирования в рассматриваемом случае) частота следования импульсов лазера составляет 30 кГц. При записи дифракционного элемента блок управления синхронизирует генерацию импульсов лазера со сканированием регистрирующего материала, а также управляет углом отклонения зеркал дефлекторов M_1 и M_2 в соответствии с информацией, заданной в виде графического файла.

Основным условием корректной работы устройства является совмещение сфокусированных пучков в плоскости регистрирующего материала, так как интерференционная решётка образуется только в области их пересечения. При наклоне любого из двух зеркал дефлектора световой пучок на выходе объектива O_2 , смещаясь вдоль одной из координат, приобретает также небольшой наклон, который приводит к расхождению пучков на величину δ . Сфокусированные пучки перекрываются не полностью, и интерференционная решётка возникает только в месте их пересечения. Можно показать, что при допустимой величине погрешности совмещения $E = \delta/D$ расстояние между зеркалами и точкой S не должно превышать

$$l_1 < 1,22E\lambda f_1 f_2 / y_1 d_1. \quad (7)$$

Если $E = 0,1$, то при $\lambda = 0,35$ мкм, $f_1 = 150$ мм, $f_2 = 100$ мм, $y_1 = 1$ мм, $d_1 = 1$ мм расстояния l_1 и l_2 не должны превышать ~ 6 мм, что конструктивно вполне достижимо.

Конструкция системы интерференционной литографии. Экспериментальная сканирующая СИЛ была собрана на базе прецизионного двухкоординатного сканирующего устройства портального типа. Канал записи (см. рис. 4), включающий в себя импульсный лазер с модулированной добротностью типа LCS DTL-374CB, средней мощностью 20 мВт и длиной волны 355 нм (ООО «Лазер-компакт», Москва), установлен на подвижной платформе (Y -координата) портала сканирующего устройства, как показано на рис. 5. В канале записи использовались быстродействующие зеркальные дефлекторы типа 6220M ("Cambridge Technology, Inc.", Великобритания) с максимальной частотой отклонения до 5 кГц и специально разработанный УФ-микрообъектив с апертурой 0,4. Портал сканирующего устройства обеспечивает быстрое перемещение (строчное сканирование) канала записи по координате Y , в то время как стол с подложкой, покрытой регистрирующим материалом, пошагово медленно перемещается по координате X . Прецизионное перемещение по координатам X и Y линейными двигателями контролируется с помощью инкрементальных датчиков положения.

Основные технические характеристики СИЛ: размер области записи 300×300 мм, точность (воспроизводимость) перемещения 1 мкм, скорость записи с произвольным заданием параметров микрорешёток в ячейках до 5000 ячеек/с, размер ячейки 5–20 мкм, период решётки в ячейке 0,6–1,5 мкм, ориентация решётки в ячейке $\pm 45^\circ$, длина волны записи 355 нм, энергия записи < 20 мкДж, длительность импульса 5–8 нс.

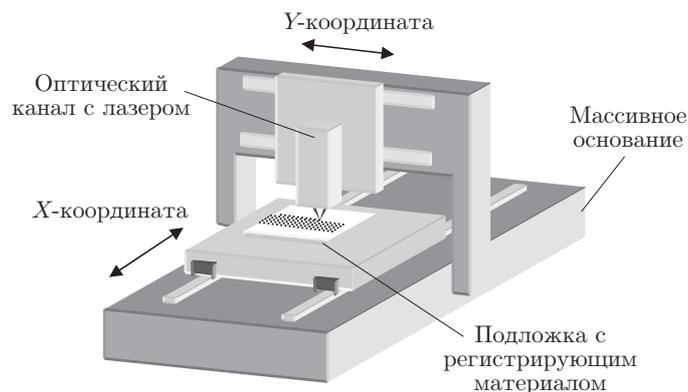


Рис. 5. Конструкция системы интерференционной литографии

Результаты тестирования системы. Для проверки возможностей разработанной СИЛ исследовалось формирование простейших тестовых структур (решёток) на регистрирующих материалах двух типов: плёнках хрома толщиной 80 нм и аморфного кремния (*a*-Si) толщиной 100 нм. Плёнки наносились магнетронным распылением на стеклянные подложки.

В проведённых экспериментах были следующие общие условия: размер сфокусированного лазерного пятна на поверхности 6–8 мкм, период интерференционной картины в пятне 1,0–1,2 мкм, скорость перемещения подложки с плёнкой относительно пятна 20 мм/с, длительность лазерных импульсов 8 нс, частота повторения импульсов 1 кГц, энергия в импульсе 1–15 мкДж, средняя мощность излучения 1–20 мВт, пропускание канала записи 40 %.

Плоскость фокусировки контролировалась датчиком ошибки фокусировки и вспомогательной видеокамерой.

Экспонирование тонких плёнок хрома. Запись микроструктур на плёнках хрома возможна как путём абляции, так и лазерной термохимией. Термохимический метод записи основан на образовании скрытого изображения на плёнке хрома после экспонирования и последующего проявления в селективном травителе [12], состоящем из смеси 25 %-ных растворов NaOH и $K_3Fe(CN)_6$ в соотношении 1 : 6.

Интерференционная картина в фокальной плоскости микрообъектива исследовалась при различной величине расфокусировки (*def*). Фотографии микрорешёток, записанных методом абляции, при различной величине дефокусировки представлены на рис. 6. Видно, что интерференционная картина формируется при достаточно точном совмещении пятен. Величина расфокусировки не должна превышать ± 10 мкм. Термохимический метод имеет ряд преимуществ перед методом абляции: более высокое качество микроструктур из-за отсутствия дефектов, вызванных неполным удалением материала, меньшая мощность лазерного излучения и более высокое пространственное разрешение из-за нелинейного механизма термохимического окисления хрома [13].

Для определения оптимальной величины энергии экспозиции записывались тестовые структуры по методике, аналогичной термохимической записи с непрерывным лазером [12]. Пример такой записи, выполненной с помощью СИЛ на плёнке хрома и проявленной в селективном травителе, приведён на рис. 7. На плёнке хрома записывались дорожки ячеек с шагом 10 мкм при последовательном уменьшении энергии от дорожки к дорожке с 3,4 до 0,2 мкДж (на выходе микрообъектива). Видно, что при записи образуется три области. Первая (от 3,4 до 2,2 мкДж) — это область плавления и испарения плёнки хрома в центре пятна и термохимии по краям пятна. Во второй области (от 1,8 до 0,2 мкДж) плавления нет, образуется скрытое изображение, которое проявляется после травления плёнки. В

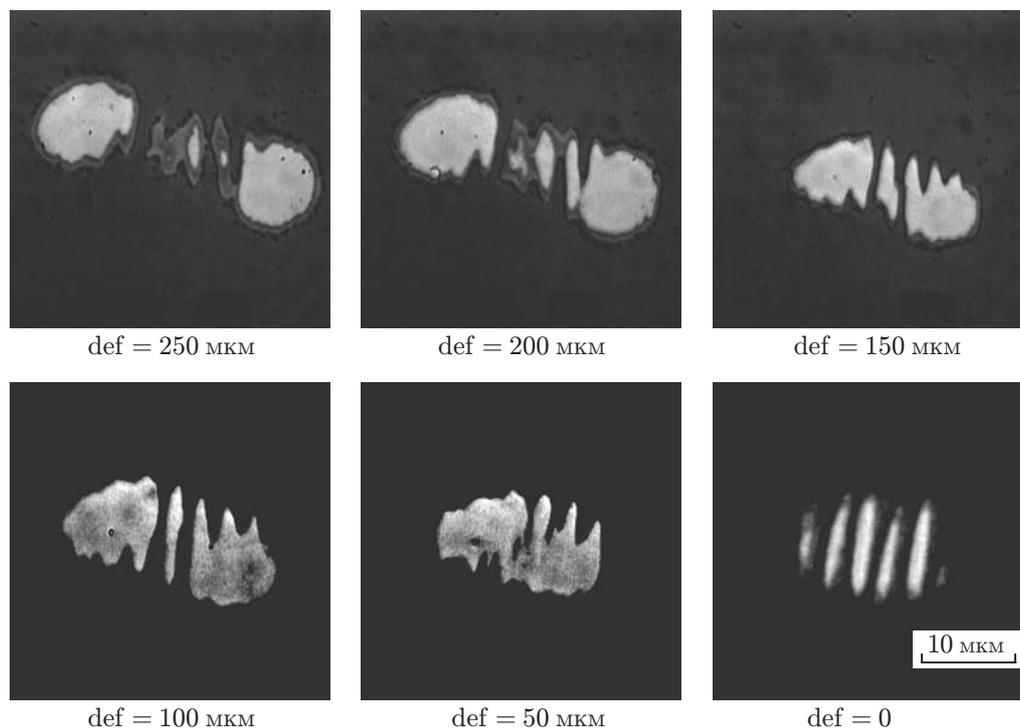


Рис. 6. Микрофотографии записанных пятен на плёнке хрома при различной расфокусировке

третьей области при малых энергиях импульсов (менее 0,2 мкДж) термохимическая запись отсутствует. Оптимальной для записи дифракционных структур можно считать в данном случае энергию импульсов 0,6–1,0 мкДж.

Экспонирование тонких плёнок аморфного кремния. В отличие от плёнок хрома запись микроструктур на плёнках *a*-Si происходит за счёт изменения пропускания плёнки в поле экспонирования [14]. Фрагменты записи микрорешёток на плёнках *a*-Si, выполненные с помощью микроскопа Микро-200Т-01, представлены на рис. 8, *a*—*c*. Видно, что при энергии более 0,2 мкДж (см. рис. 8, *b*) имеет место испарение плёнки *a*-Si, в то время как при более низкой энергии (см. рис. 8, *c*) формируется решётка высокого качества путём просветления плёнки. Сравнивая микрорешётки, отметим, что метод записи на *a*-Si

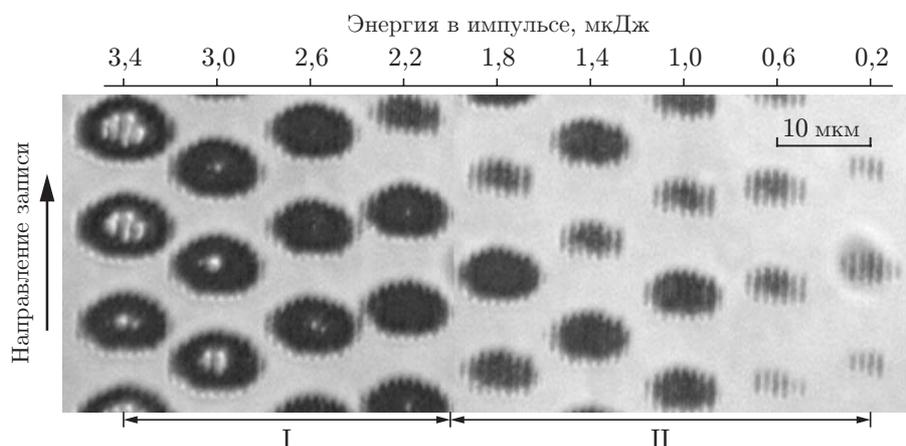


Рис. 7. Микрофотография фрагмента тестовой записи на плёнке хрома

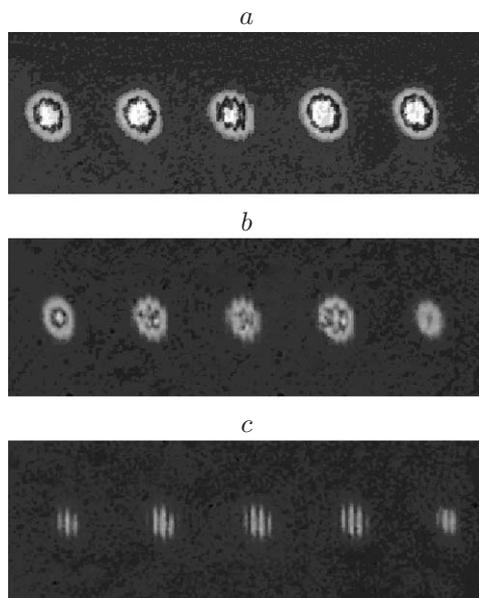


Рис. 8. Фотографии (в проходящем свете) микрорешёток, записанных на плёнке *a*-Si. Энергия в импульсе (мкДж): 0,60 (*a*), 0,22 (*b*), 0,10 (*c*)

при длине волны 355 нм имеет примерно в 5–6 раз более высокую чувствительность, чем термохимическая запись на плёнках хрома, и в 20–30 раз по сравнению с методом абляции.

Данные рентгеноструктурного анализа, выполненного на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3, показали, что исходная плёнка состоит из аморфной фазы без следов кристаллизации (рис. 9, *a*). На дифрактограмме, полученной на экспонированной плёнке, кроме аморфной выявлена фаза кристаллического кремния (рис. 9, *b*). Кристаллографическая плоскость роста (111) соответствует углу $14,3^\circ$ и является характерной плоскостью роста для монокристаллического кремния.

Из проведённых структурного и морфологического анализов следует, что в результате локального нагрева исходный аморфный кремний переходит в микрокристаллическую фазу с локальным увеличением объёма. Аналогичное поведение плёнок *a*-Si наблюдалось при записи непрерывным лазерным пучком [14].

Для практического применения интерференционной литографии на плёнках аморфного кремния необходимо перевести амплитудную микроструктуру в поверхностный микро-

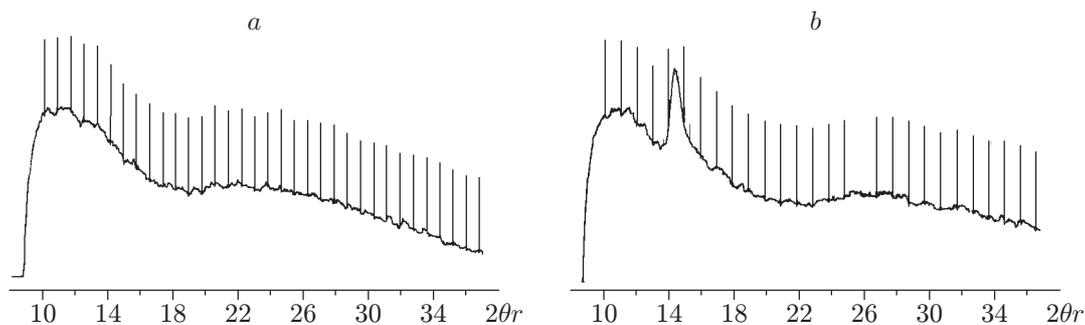


Рис. 9. Дифрактограммы, полученные с поверхности аморфных плёнок кремния: свободной от записанных дифракционных элементов (*a*) и на которой была произведена запись дифракционных структур (*b*). Угол $2\theta r$ соответствует углу поворота гониометра дифрактометра

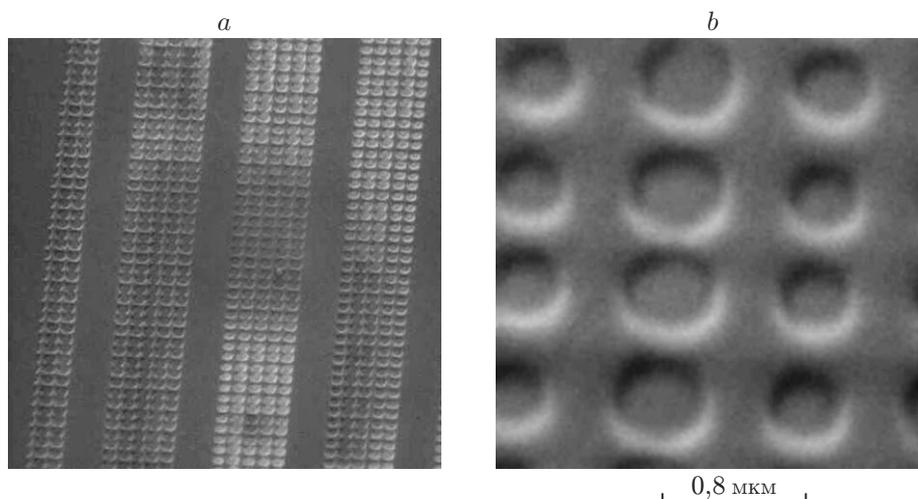


Рис. 10. Изображения, полученные на электронном сканирующем микроскопе: *a* — дорожки питов с периодом 0,8 мкм; *b* — увеличенное изображение самой правой группы дорожек

рельеф заданной глубины. Для создания глубоких дифракционных структур использовалась технология, описанная в работе [15]. На экспонированную плёнку кремния наносится плёнка фоторезиста, которая экспонируется через стеклянную подложку. Таким образом, обеспечивается идеальный контакт маски, записанной на плёнке аморфного кремния, с плёнкой фоторезиста. Этот метод опробован в представленной работе при переносе амплитудной пропускающей микроструктуры в виде последовательности овальных питов, сформированной прямой записью сфокусированным лазерным пучком на плёнке *a*-Si, в поверхностный рельеф в фоторезисте (рис. 10). Изображения на рисунке убедительно демонстрируют возможность формирования рельефных структур с размером элементов менее 0,5 мкм путём обратного экспонирования покрытых фоторезистом высокоразрешающих амплитудных масок, сформированных в плёнках аморфного кремния.

Заключение. В данной работе описана сканирующая система интерференционной литографии, предназначенная для формирования дифракционных микроструктур из микрорешёток с произвольной ориентацией и периодом 0,6–1,5 мкм при общем размере до 300 мм.

Разработанная система использована для исследования прямой импульсной интерференционной записи микрорешёток на плёнках хрома и аморфного кремния, нанесённых магнетронным распылением на стеклянные подложки. Поверхностный рельеф, сформированный в плёнках хрома, может быть напрямую перенесён в фазовый рельеф на поверхности подложки с помощью ионно-плазменного травления. В случае применения интерференционной литографии для записи на плёнках аморфного кремния требуется дополнительный этап нанесения фоторезиста на их поверхность и последующее экспонирование через подложку. В отличие от более простой интерференционной литографии по фоторезисту запись на плёнках *a*-Si позволяет получить существенную нелинейность за счёт модуляции поглощения плёнки в процессе воздействия излучения [14].

Дифракционные структуры, состоящие из микрорешёток, сформированных сканирующей интерференционной литографией, могут использоваться для создания просветляющих субволновых покрытий оптических элементов, графических микроструктур защитных марок на продукцию [5], дифракционных устройств для аттенюации мощного лазерного излучения [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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 // *Appl. Opt.* 1999. **38**, N 8. P. 1295–1301.
2. **Yamazaki K., Saifullah M. S., Namatsu H., Kurihara K.** Sub-10-nm electron-beam lithography with sub-10-nm overlay accuracy // *Proc. SPIE.* 2000. **3997**. P. 458–466.
3. **Schopf R. E., Hultsch T., Lotz J. et al.** Antireflective submicrometer surface-relief gratings for solar applications // *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 1998. **54**, N 1. P. 333–342.
4. **Southwell W. H.** Pyramid-array surface-relief structures producing antireflection index matching on optical surfaces // *JOSA A.* 1991. **8**, N 3. P. 549–553.
5. **Poleshchuk A. G., Kutanov A. A., Malishev A. I. et al.** High-speed laser writing system for diffractive optical elements and dot matrix holograms fabrication // Meeting "Diffractive Optics 2005". 3–7 September 2005, Warsaw, Poland.
6. **Шредер Г.** Техническая оптика. Сер. Мир физики и техники. М.: Техносфера, 2006. 424 с.
7. **Бредихин В. И., Буренина В. Н., Вережкин Ю. К. и др.** Наноразмерная интерференционная литография с импульсным УФ лазером // *ЖТФ.* 2004. **74**, N 9. P. 86–92.
8. **Chen C. G., Konkola P. T., Heilmann R. K. et al.** Nanometer-accurate grating fabrication with scanning beam interference lithography // *Proc. SPIE.* 2002. **4936**. P. 126–134.
9. **Takahashi S., Toda T., Iwata F.** Three-dimensional grating images // *Proc. SPIE.* 2006. **1461**. P. 199–205.
10. **Пат. № 007874 Евразия.** Устройство для записи дифракционных элементов /А. Г. Полещук, А. А. Кутанов, В. П. Бессмельцев, И. А. Снимщиков. Опубл. 2007, Бюл. № 1.
11. **Справочник** конструктора оптико-механических приборов /Под ред. В. А. Панова. Л.: Машиностроение, 1980. 742 с.
12. **Cherkashin V. V., Churin E. G., Korolkov V. P. et al.** Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOE's on chromium films // *Proc. SPIE.* 1997. **3010**. P. 168–179.
13. **Veyko V. P., Shakhno E. A., Poleshchuk A. G. et al.** Local laser oxidation of thin metal films: Ultra-resolution in theory and in practice // *Proc. of the 9th Intern. Symp. on Laser Precision Microfabrication (LPM-2008).* June 16–20, 2008. Quebec City, Canada.
14. **Gotchiyaev V. Z., Korolkov V. P., Sokolov A. P., Chernukhin V. P.** High resolution optical recording on a-Si films // *Journ. Non-Crystalline Solids.* 1991. **137&138**. P. 1297–1300.
15. **Korolkov V. P., Koronkevich V. P., Malyshev A. I., Nikitin V. G.** New fabrication method for diffractive optical elements with deep phase relief // *Proc. SPIE.* 1997. **3010**. P. 180–191.
16. **Пат. № 2285942 РФ.** Дифракционный аттенюатор с переменным пропусканием /Д. Э. Денк, А. Г. Полещук. Опубл. 20.10.2006, Бюл. № 29.

Поступила в редакцию 22 сентября 2009 г.
