

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.4 : 681.7-1/9

МНОГОПУЧКОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ
ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ*

А. Г. Полещук, А. Р. Саметов, А. Г. Седухин

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: poleshchuk@iae.nsk.su*

Предложен и исследован новый вариант метода многопучковой прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Формирование области записи в виде массива сфокусированных световых пятен осуществляется путём расщепления записывающего лазерного пучка на несколько пучков с помощью дифракционной решётки Даммана и фокусировки этих пучков на плоскости подвижного носителя со светочувствительным материалом. Подстройка радиального шага записи и коррекция равномерности интенсивности пучков производится путём поворота решётки Даммана и её смещения в направлении дисперсии. При записи ДОЭ радиальный шаг дискретного смещения области записи относительно плоскости ДОЭ задаётся равным либо кратным среднему радиальному расстоянию между радиальными проекциями центров сфокусированных световых пятен. Данный вариант обеспечивает повышенную производительность и точность вследствие высококачественного распараллеливания записывающего пучка и эффекта усреднения при записи с наложением.

Ключевые слова: прямая лазерная запись, фокусировка излучения, дифракционные решётки, дифракционный аксикон, термохимическое окисление плёнок.

Введение. В настоящее время известно несколько основных способов изготовления дифракционных оптических элементов (ДОЭ): оптические (интерференционные или голографические), алмазное точение, запись сканирующим пучком (электронным или лазерным). Оптические методы [1] широко применялись на раннем этапе развития дифракционной оптики. Возможности этих методов ограничены в основном изготовлением регулярных круговых или линейных зонных пластинок. Алмазное точение [2] — хорошо зарекомендовавший себя процесс изготовления высокоточных оптических поверхностей металлов, полимеров и кристаллов. Данный метод позволяет получать фазовый профиль с блеском. Однако область применения алмазного точения также ограничена изготовлением ДОЭ с аксиальной симметрией. Сканирующие методы прямой лучевой записи микроструктур являются наиболее универсальными и широко используются в микроэлектронике. Эти методы основаны на сканировании сфокусированным амплитудно-модулированным лазерным или электронным пучком поверхности подложки, покрытой слоем фоторезиста. Для ускорения записи часто используют несколько записывающих пучков [3]. В устройствах для изготовления фотошаблонов микросхем применяются массивы из 16, 32 или более сфокусированных лазерных пучков [4].

*Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта Президиума СО РАН (№ 112), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 24-8) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-02-00974-а и № 12-02-01118-а).

Для изготовления ДОЭ с аксиальной либо линейной симметрией (типа линейных и кольцевых решёток, дифракционных аксиконов и т. п.) в ряде случаев достаточно сформировать область записи в виде участка простой и регулярной интерференционной картины. Указанная область характерна для метода интерференционной литографии [5, 6]. Она формируется в фокальной плоскости микрообъектива в ограниченной области пересечения двух наклонённых друг к другу сфокусированных пучков света (рис. 1, *a*). При этом за одну экспозицию записывается структура ДОЭ, промодулированная интерференционной картиной, как это показано на рис. 1, *b*. Для грубой оценки параметров изначально можно принять, что распределение световой освещённости по входному зрачку фокусирующего объектива является равномерным, а угол наклона пучков приближённо совпадает с полным апертурным углом объектива. Тогда период интерференционных полос распределения интенсивности света в области записи будет составлять $P_1 = \lambda / (2NA)$, где λ — длина волны излучения лазера; $NA = n \sin \alpha$ — числовая апертура фокусирующего объектива; 2α — полный угол наклона когерентных лазерных пучков, приближённо равный апертурному углу объектива. Для объектива с числовой апертурой $NA = 0,65$ при $\lambda = 0,4$ мкм период $P_1 \sim 0,31$ мкм. Перемещая по двум координатам фоточувствительную поверхность, можно сформировать достаточно протяжённую область ДОЭ. Метод интерференционной лазерной литографии хорошо применяется для записи по интегрирующим фоточувствительным средам типа фоторезистов. Однако для прямой записи на материалах с пороговыми характеристиками (в режимах абляции материала или при термохимическом режиме записи) этот метод не используется. Его недостатки заключаются в дефектах самой структуры области записи, представленной на рис. 1, *b*: интерференционная картина имеет близкую к гауссовской огибающую в продольном направлении (в плоскости максимального наклона интерферирующих пучков), а отдельные пятна в интерференционной картине плохо локализованы в поперечном направлении и имеют сильно вытянутую форму.

Целью данной работы является создание новой концепции построения оптической схемы многопучковой фокусировки лазерного луча, позволяющей улучшить качество записи ДОЭ.

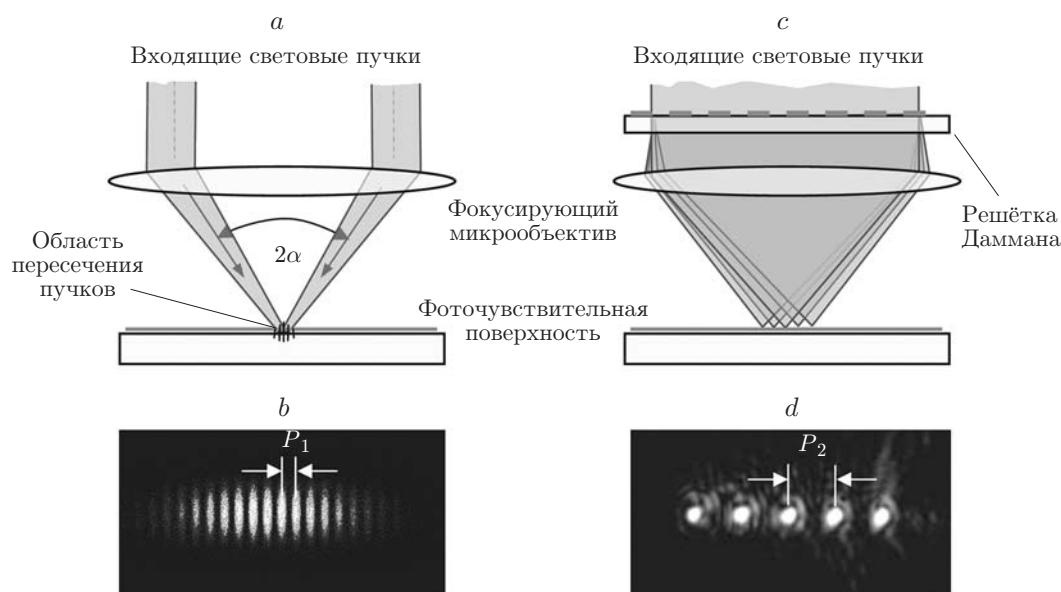


Рис. 1. Оптические схемы многопучковых методов записи: на основе интерференции двух пучков (*a, b*) и деления входного пучка решёткой Даммана (*c, d*)

Метод записи. В данной работе развивается подход к формированию одномерного регулярного массива записывающих пятен, предложенный в [7]. Этот подход в существенной мере свободен от вышеуказанных недостатков. Он основан на формировании линейного массива сфокусированных световых пятен путём деления записывающего пучка разветвляющей решёткой Даммана (РД), установленной перед фокусирующим объективом (рис. 1, *c*). Количество записывающих пятен может варьироваться от двух, трёх, пяти (рис. 1, *d*) до нескольких десятков и сотен при смене решёток. В общем случае вместо РД может быть применён пространственный модулятор света [8], в котором фазовая функция, имитирующая решётку Даммана, формируется и динамически управляется компьютером.

В параксиальном приближении период следования пятен P_2 в плоскости фоточувствительной поверхности определяется как $P_2 = \lambda f / T_d$, где T_d — период решётки Даммана, f — фокусное расстояние микрообъектива. Основным ограничением данного метода является необходимость обеспечения конечного расстояния между отдельными пятнами для устранения заметной паразитной интерференции между ними. При грубом приближении это означает, что период следования пятен P_2 должен не менее чем в 2 раза превышать полный размер сфокусированного пятна d_2 , приближённо (в параксиальном приближении и при равномерном освещении входного зрачка объектива) оцениваемый по уровню спада интенсивности до нулевого уровня как $d_2 \sim 1,22\lambda / NA = 2,44P_1 \sim 0,75$ мкм. Таким образом, период P_2 должен, по меньшей мере, в 4,88 раза превышать период P_1 , характерный для предыдущего метода.

Далее излагаются особенности записи кольцевых ДОО в полярной системе координат. Для оперативного изменения периода записываемой дифракционной структуры предлагается дополнительно ввести операцию по изменению наклона массива пятен, как схематически показано на рис. 2. Предполагается, что падение светового пучка на РД является нормальным. Из теоремы косинусов следует, что при развороте массива на угол φ (путём разворота решётки Даммана) период следования записываемой структуры P'_2 , ближайший к центральному пятну записи, изменяется как

$$P'_2 = R_0 - \sqrt{R_0^2 + P_2^2 - 2R_0P_2 \cos \varphi},$$

где R_0 — радиус центрального пятна записи. В приближении $P_2 \ll R_0$ имеем $P'_2 = P_2 \cos \varphi$. Таким образом, на радиусах записи, существенно превышающих основной период следования пятен в массиве, погрешность нелинейности распределения центров пятен по радиусам записи является пренебрежимо малой.

Моделирование фокусирующей системы с коррекцией равномерности деления пучков. Из соображений простоты экспериментальной реализации в данной работе исследована многолучевая фокусирующая система с набором бинарных амплитудно-

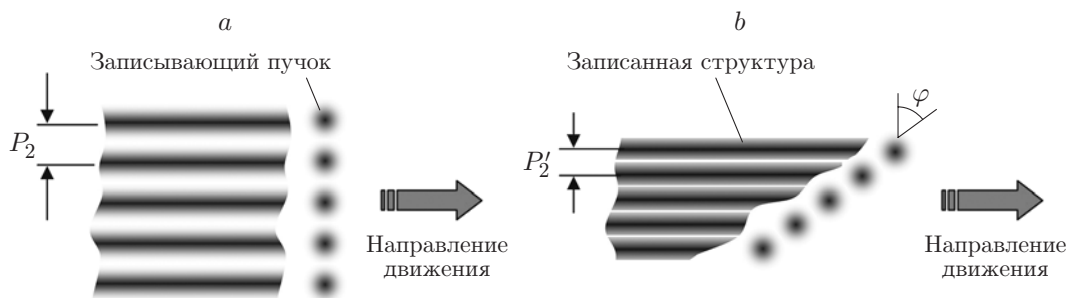


Рис. 2. Формирование треков дифракционной структуры при углах разворота массива сфокусированных пятен: $\varphi = 0$ (a) и $\varphi = 60^\circ$ (b)

фазовых решёток Даммана с коэффициентами деления (разветвления) 3, 5 и 7. Расчёт структуры решёток был произведён с помощью методов оптимизации путём синтеза равномерных фурье-спектров решёток (в рабочих порядках дифракции) в приближении бесконечно большого числа их периодов. Одной из особенностей данного метода является то, что при записи ДОЭ с высокими пространственными частотами структур записывающие сфокусированные световые пятна желательнее располагать на малых расстояниях, сравнимых с их диаметрами. Однако при этом во входном зрачке фокусирующего объектива число периодов решёток Даммана оказывается небольшим, что является отклонением от указанного расчётного приближения бесконечной линейной апертуры решёток. Соответственно, распределение освещённости в максимумах записывающих пятен может отличаться от расчётного возможным ухудшением равномерности распределения интенсивности пучков. Вместе с тем отказ от РД с их псевдорегулярными структурами (удобными при выставлении и юстировках в оптической системе) и замена таких решёток специализированными дифракционными элементами с краевой коррекцией и точным учётом распределения освещённости во входном зрачке записывающего объектива (метод точной расчётной подгонки оптической системы) представляется неэффективным из практических соображений. Следует также помнить и о других положительных качествах решёток Даммана, которые хотелось бы сохранить, — повышенной устойчивости к изменению распределения освещённости по входной линейной апертуре и слабой критичности картины выходного распределения к смещению решёток (при разъюстировке в процессе эксплуатации). В этой связи представляет интерес подход, основанный на сохранении РД в оптической системе и исследовании возможности тонкой коррекции и выравнивания распределения коэффициента их деления. При малом рабочем числе периодов РД указанную коррекцию предлагается осуществлять путём смещения этих решёток относительно входного зрачка фокусирующего объектива в направлении дисперсии в пределах их периода.

Отметим, что получение высокой равномерности распределения коэффициента деления пучков является особенно важным при исследуемых в данной работе пороговых термических режимах записи ДОЭ — термохимическом и абляционном. Здесь предполагается также, что при выборе оптимального рабочего участка записи структуры ДОЭ при термическом окислении регистрирующего материала (тонких плёнок хрома), несмотря на нелинейную зависимость роста толщины окисленных плёнок, в определённых пределах соблюдается закон взаимозаместимости для фотохимии, согласно которому полная экспозиция материала (а соответственно, и толщина окисленного слоя) зависит только от произведения интенсивности записывающего пучка и продолжительности его воздействия (величины, обратной скорости сканирования регистрирующего материала). В таком случае полную дозу экспозиции можно набрать за несколько шагов записи с наложением треков при дискретном смещении фокусирующей системы на шаг, равный шагу следования световых пятен в области записи. Кроме того, при указанном режиме возможно усреднение ошибок позиционирования фокусирующей системы на отдельных шагах и таким образом повышение точности записи синтезируемого ДОЭ.

При относительно высокой числовой апертуре исследуемой фокусирующей оптической системы (в частности, для использованного в работе безиммерсионного объектива с $NA = 0,65$) начинает сказываться выход за пределы параксиальной области. Соответственно, при расчёте поля дифракции требуется учитывать поправку на изменение весового вклада периферийных волн Гюйгенса по отношению к центральным (параксиальным) волнам. Кроме того, при малом числе периодов РД во входном зрачке и близком расположении сфокусированных пятен в выходной фокальной плоскости усиливается необходимость учёта поправки на круглую форму входного зрачка. Вместе с тем эффекты асимметрии формы сфокусированных световых пучков проявляются ещё незначительно. Поэтому с достаточной степенью точности расчёт поля указанных «умеренно сфокусиру-

ванных» пучков допустимо проводить в скалярном приближении. С учётом изложенного математически удобное для расчёта и достаточно точное представление комплексной амплитуды волнового поля $U_{\text{вых}}(x, y)$ в фокальной плоскости фокусирующего объектива можно определить в виде следующего скалярного дифракционного интеграла Дебая:

$$U_{\text{вых}}(x, y) = \frac{i}{\lambda} \iint_{s_x^2 + s_y^2 \leq \sin^2 \alpha} A_{\text{вх}}(s_x, s_y) T_{\text{РД}}(s_x, s_y) \frac{\exp[ik(s_x x + s_y y)]}{\sqrt{1 - s_x^2 - s_y^2}} ds_x ds_y =$$

$$= \frac{i}{\lambda} F^{-1} \left\{ \frac{A_{\text{вх}}(s_x, s_y) T_{\text{РД}}(s_x, s_y)}{\sqrt{1 - s_x^2 - s_y^2}} \right\} \Big|_{s_x^2 + s_y^2 \leq \sin^2 \alpha},$$

где x и y — координаты в плоскости фокусирующего объектива; s_x и s_y — направляющие косинусы (в плоскостях, пересекающих оси x и y) элементарных волновых векторов; $A_{\text{вх}}(s_x, s_y)$ — распределение комплексной амплитуды поля во входном зрачке фокусирующего объектива перед решёткой Даммана; $T_{\text{РД}}(s_x, s_y)$ — функция амплитудного пропускания РД; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число;

$$F^{-1}\{G\} = \iint_{-\infty}^{\infty} G(s_x, s_y) \exp[ik(s_x x + s_y y)] ds_x ds_y$$

— двумерный инверсный фурье-образ функции $G(s_x, s_y)$ для нормированных пространственных частот s_x и s_y .

При численном моделировании распределение $A_{\text{вх}}(s_x, s_y)$ принималось соответствующим усечённой гауссовой функции с усечением по уровню $\exp(-1)$ при $\alpha = 26,6^\circ$:

$$A_{\text{вх}}(s_x, s_y) = \begin{cases} \exp(-s_x^2 - s_y^2), & s_x^2 + s_y^2 \leq \sin^2 \alpha, \\ 0, & \sin^2 \alpha < s_x^2 + s_y^2 \leq 1. \end{cases}$$

В качестве примера результатов исследования на рис. 3, *a* показано моделирование решётки Даммана с коэффициентом разветвления 5 при начальном симметричном центрировании структуры одного из периодов решётки по отношению к входному зрачку фокусирующего объектива. Как можно видеть, во входном зрачке уместается приблизительно шесть периодов решётки Даммана. На рис. 3, *b* приведён профиль соответствующего расчётного распределения интенсивности света в фокальной плоскости объектива вдоль оси x . Разброс между максимальными и минимальными значениями интенсивности света в полезных порядках достигает 8,2 %. Существенного уменьшения данного разброса удаётся достичь путём эмпирической коррекции положения решётки при её смещении в направлении дисперсии — вдоль поперечной координаты x_0 (в плоскости решётки). На рис. 4, *a* показан результат моделирования маски той же решётки Даммана, но расположенной асимметрично по отношению ко входному зрачку объектива со смещением вдоль оси x_0 на 37 % от периода решётки. На рис. 4, *b* отображён новый профиль расчётного распределения интенсивности света в фокальной плоскости объектива вдоль оси x . Для нового профиля расчётный разброс интенсивностей света в полезных порядках уменьшается до уровня $\sim 0,74$ %. Таким образом, в данном примере коррекцией линейного положения РД удаётся добиться существенного (на порядок величины) уменьшения разброса интенсивностей света в сфокусированных пучках.

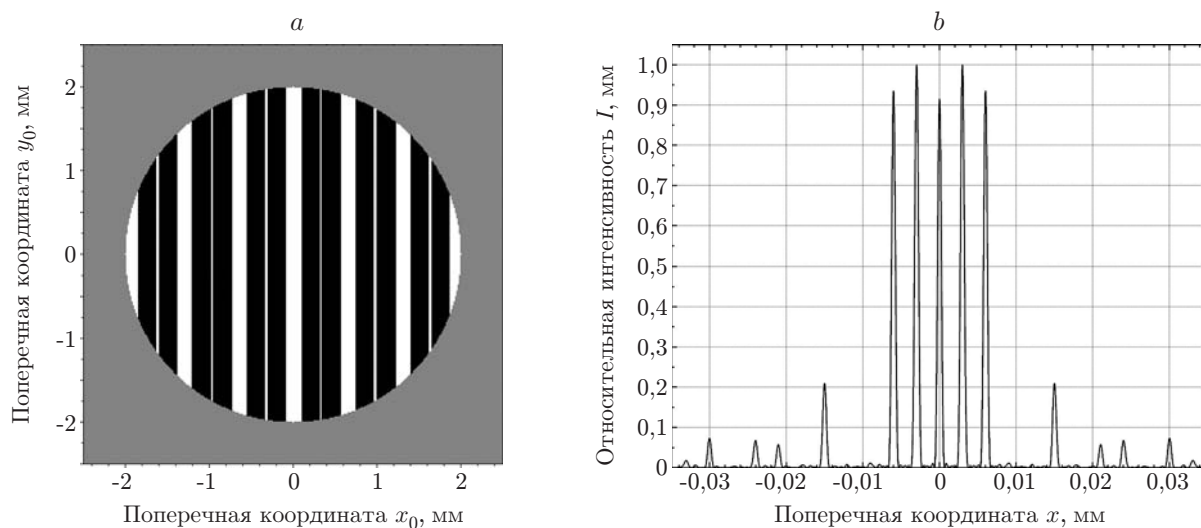


Рис. 3. Отображение бинарно-фазовой решётки Даммана и её отклик: *a* — чёрно-белая симуляция структуры решётки, симметрично расположенной по отношению к центру входного зрачка фокусирующего объектива; *b* — соответствующий нормированный профиль расчётной интенсивности света в фокальной плоскости объектива вдоль оси x

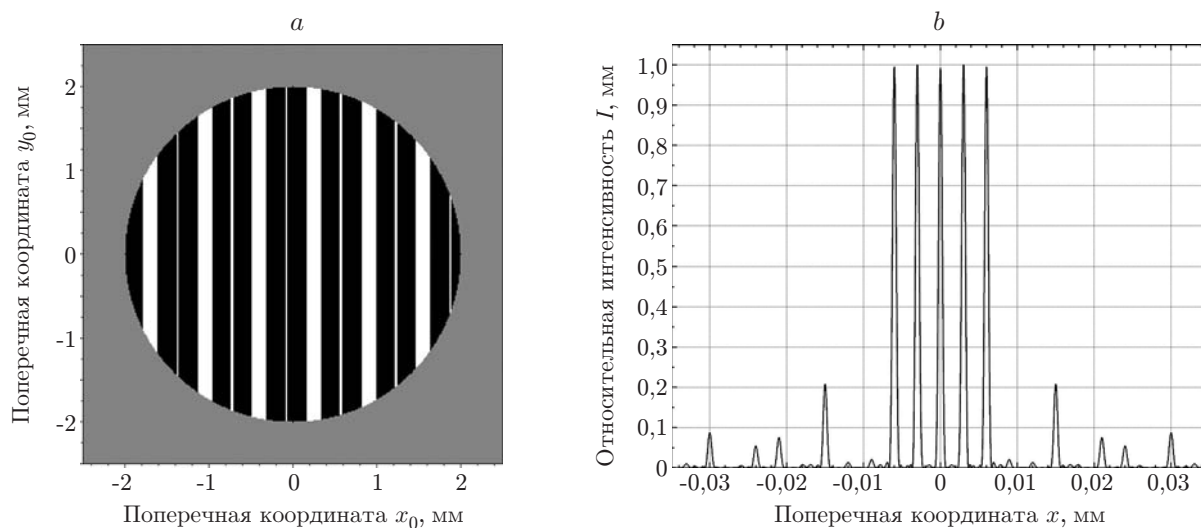


Рис. 4. Отображение бинарно-фазовой решётки Даммана и её отклик: *a* — чёрно-белая симуляция структуры решётки, смещённой по отношению к центру входного зрачка фокусирующего объектива на 37 % от периода решётки; *b* — соответствующий нормированный профиль расчётной интенсивности света в фокальной плоскости объектива вдоль оси x

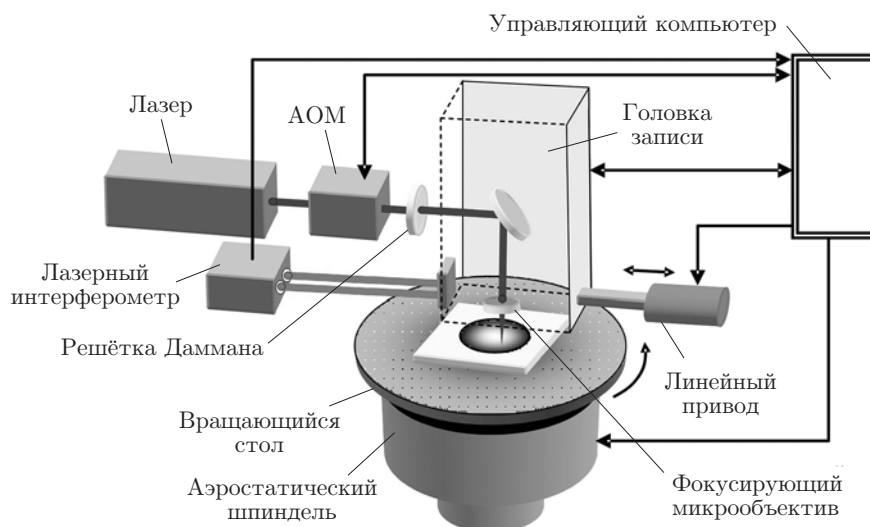


Рис. 5. Установка лазерной записи CLWS-300IAE

Экспериментальная реализация. Предложенный метод записи был проверен на установке круговой лазерной записи CLWS-300IAE [9], упрощённая схема которой приведена на рис. 5. Подложка с фоточувствительной поверхностью крепится на вращающемся столе (угловая скорость вращения $5\text{--}11\text{ с}^{-1}$). Излучение записывающего лазера ($\lambda = 532\text{ нм}$, $P = 0,6\text{ Вт}$) модулируется системой акустооптических модуляторов (АОМ), проходит решётку Даммана и направляется к головке записи. Микрообъектив ($NA = 0,65$) фокусирует излучение на поверхность подложки. Перемещение головки записи в радиальном направлении осуществляется линейным приводом с точностью до 20 нм (среднеквадратичное значение).

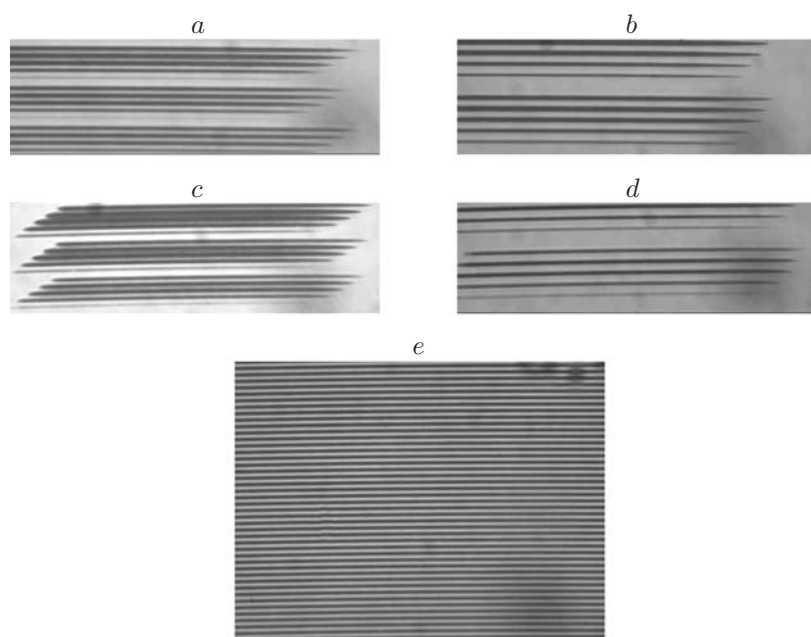


Рис. 6. Тесты экспериментальных записей на плёнке хрома массивом из пяти пятен: при двух углах поворота ($0\text{--}60^\circ$) на двух радиусах записи $6,65\text{--}7\text{ мм}$ (a, c) и $2,65\text{--}3\text{ мм}$ (b, d); микрофотография (e) фрагмента кольцевой решётки с периодом $1,6\text{ мкм}$, записанной на радиусе 4 мм

В данной работе исследования проводились с решётками Даммана с делением входного пучка на три, пять и семь пучков. Основным период выбирался $T_d = 0,6$ мм и обеспечивал шаг пятен в массиве около 3 мкм (см. рис. 4). Типичная фотография распределения излучения (при коэффициенте разветвления пучков, равном 5) в плоскости подложки показана на рис. 1, *d*.

Исследовалась запись дифракционных структур, сформированных методом лазерной термохимии [10, 11] по тонким плёнкам хрома, нанесённым методом магнетронного напыления на подложки из оптического стекла. Толщина плёнки хрома составляла $\sim 20\text{--}40$ нм. На рис. 6 приведены типичные фотографии тестовых записей по плёнке хрома после проявления в селективном травителе. Анализировались структуры при нескольких значениях угла поворота массива сфокусированных пятен на разных радиусах записи (разных скоростях движения подложки относительно сфокусированных пятен). На рисунке представлен пример записи дифракционного аксикона. Шаг записи составлял 1,6 мкм и был синхронизован с периодом массива сфокусированных пятен $P'_2 = 1,6$ мкм. Такой метод обеспечивает эффективное усреднение погрешностей радиальной координатной системы установки записи, так как каждая зона аксикона формируется за пять последовательных проходов.

Заключение. В данной работе предложен и экспериментально апробирован новый вариант многопучкового лазерного термохимического метода записи дифракционных структур на плёнках хрома, при котором оптическое формирование массива записывающих пятен осуществляется решёткой Даммана, установленной перед фокусирующим объективом. Изменение периода записываемой структуры и коррекция равномерности интенсивности пучков обеспечивается соответственно поворотом и линейным смещением решётки Даммана в направлении её дисперсии. Экспериментальные результаты исследования показали, что при использовании решётки с коэффициентом разветвления, равным 5, повернутой на угол 60° и смещённой на 37 % от периода решётки, удаётся сформировать высококачественную 5-пучковую область записи для синтеза ДОЭ с регулярной кольцевой структурой (дифракционного аксикона) с периодом 1,6 мкм. Запись проводилась с наложением смежных треков на шаг, соответствующий радиальной проекции периода следования пятен в области записи. Микроскопические и спектральные исследования синтезированных структур подтверждают эффект усреднения при формировании кольцевых элементов синтезированных ДОЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А.** Киноформные линзы, ч. I. Оптический метод получения фотошаблона // *Автометрия*. 1977. № 5. С. 71–79.
2. **Sweeney D. W., Sommarger G.** Single element achromatic diffractive lens // *Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Application (Topical Meeting)*. Rochester, USA, 1994. P. 26.
3. **Баев С. Г., Бессмельцев В. П., Слуев В. А.** Лазерный фотоплоттер для изготовления высококачественных фотошаблонов // *Электроника НТБ*. 2002. № 3. С. 60–63.
4. **Valentin G. E., Namaker H. C., Daniel J. P.** Improved throughput in 0.6-NA laser reticle writers // *Proc. SPIE*. 2001. **4186**. P. 46–57.
5. **Бредихин В. И., Буренина В. Н., Вережкин Ю. К. и др.** Наноразмерная интерференционная литография с импульсным УФ лазером // *ЖТФ*. 2004. **74**, № 9. С. 86–90.
6. **Полецук А. Г., Кутанов А. А., Бессмельцев В. П. и др.** Микроструктурирование оптических поверхностей: технология и устройство прямой лазерной записи дифракционных структур // *Автометрия*. 2010. **46**, № 2. С. 86–96.

-
7. **Полещук А. Г., Корольков В. П., Седухин А. Г. и др.** Многопучковая прямая лазерная запись дифракционных микроструктур // Сб. тр. VIII Междунар. конф. «ГОЛОЭКСПО-2011». 29 сентября — 1 октября 2011, Минск. С. 318–321.
 8. **Jenness N., Wulff K., Johannes M. et al.** Three-dimensional parallel holographic micropatterning using a spatial light modulator // Opt. Express. 2008. **16**, N 20. P. 15942–15948.
 9. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P., Korolkov V. P.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. **38**, N 8. P. 1295–1301.
 10. **Вейко В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. и др.** Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур // Квантовая электроника. 2011. **41**, № 7. С. 631–636.
 11. **Korolkov V. P., Poleshchuk A. G.** Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements // Proc. SPIE. 2007. **6732**. 67320X.

Поступила в редакцию 23 марта 2012 г.
