

УДК 535.44

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ
ОТВЕСНЫХ УЧАСТКОВ
КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНОГО ПРОФИЛЯ
ПРИ ОДНОСТАДИЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЗАПИСИ ДОО
НАКЛОННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ**

В. П. Кирьянов¹, В. Г. Никитин²

¹*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*

²*Hong Kong Applied Science and Technology Research Institute, Photonics Centre,
2 Science Park East Avenue, Hong Kong Science Park, Shatin, Hong Kong
E-mail: kiryanov@iae.nsk.su*

Представлены результаты моделирования важнейшей составляющей одностадийной технологии записи киноформных линз в толстых слоях фоторезистов с повышенной дифракционной эффективностью, реализуемой за счёт формирования обратных скатов зон Френеля с крутизной до 90° с помощью наклонных лазерных пучков. Показано, что подобная методика записи объёмных структур в фоторезистах с малым контрастом ($k = 3$) позволяет существенно увеличить крутизну обратных скатов зон, а в фоторезистах со средним контрастом ($k = 10$) — формировать практически отвесные скаты.

Ключевые слова: дифракционная эффективность, технология записи, профили ДОО, контраст фоторезистов, обратные скаты дифракционных зон, наклонные пучки.

DOI: 10.15372/AUT20170602

Введение. Качество изготовления дифракционных оптических элементов (ДОО) определяется рядом характеристик, среди которых дифракционная эффективность — одна из основных. В [1] утверждается, что «... разработка новых технологий изготовления ДОО, позволяющих получить высокую дифракционную эффективность на механически и химически стойких материалах, является главным направлением развития прикладной дифракционной оптики. Методы прямой лазерной записи [2, 3] с аналоговым управлением интенсивностью записывающего пучка на плёнках рельефообразующих материалов (резистов) позволяют избавиться от многочисленных операций совмещения фотошаблона и сформированного на предыдущем шаге микрорельефа». Как следует далее, в этих случаях для сохранения линейной зависимости толщины проявленного слоя фоторезиста от экспозиции необходимо использовать слабоконтрастные фоторезисты и проявители. А это является причиной того, что «... невозможно получить вертикальные стенки на границе дифракционных зон и, как следствие, высокую дифракционную эффективность для узких зон» [1]. В качестве альтернативы в [1] предлагается использовать разновидности методов, соединяющих в себе приёмы как из многошаблонных бинарных технологий, так и из одностадийных аналоговых технологий [4–6]. Это приводит к заметному усложнению технологии записи ДОО с кусочно-непрерывным профилем. На наш взгляд, к настоящему времени не все возможные варианты реализации одностадийных аналоговых технологий экспериментально опробованы. В [7] предложен новый способ прямой лазерной записи киноформных линз в толстых слоях фоточувствительных материалов типа фоторезистов, использующий принцип записи объёмных структур наклонными пучками.

Цель данной работы — представить результаты численного моделирования эффективности предложенной в [7] одностадийной технологии записи наклонными лазерными

пучками кусочно-непрерывных профилей ДОО с повышенной крутизной обратных скатов, возникающих на границах дифракционных зон, и показать перспективность её применения.

Запись наклонными пучками кусочно-непрерывных профилей ДОО с повышенной крутизной обратных скатов. В основу нового способа записи объёмных структур ДОО в толстых слоях фоточувствительных материалов типа фоторезистов положены два постулата: первый — излучение лазера, сфокусированное на поверхности фоточувствительного материала типа фоторезиста, проходит границу раздела сред и распространяется внутри фоторезиста в соответствии с законами оптики, экспонируя материал пропорционально плотности мощности подведённого излучения; второй — для формирования топологии киноформных линз требования к пространственному разрешению оптической системы записи существенно ниже, чем для записи бинарных профилей линз Френеля.

Очевидным следствием первого постулата является сам механизм формирования следа взаимодействия лазерного излучения с фоторезистом. Пусть в генераторе изображений используется гелий-кадмиевый лазер с выходным излучением в УФ-области на длине волны 325 нм. Его выходное излучение в поперечном сечении характеризуется гауссовым распределением. Характер распределения интенсивности излучения гауссовых пучков в окрестностях точки фокусировки можно представить выражением [8]

$$I_g(x, y, z) = \frac{2P}{\pi r_{0\min}^2} \exp \left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2(z)} \right], \quad (1)$$

где $r_0(z) = r_{0\min} \sqrt{1 + (\lambda z / \pi r_{0\min}^2)}$ — радиус пучка за пределами фокальной плоскости; $r_{0\min} = f\lambda / \pi R$ — радиус пятна в точке фокусировки (f — фокусное расстояние объектива, λ — длина волны излучения, R — радиус пучка излучения на входе объектива). Нас особо интересует та часть поперечного сечения пучка, распространяющегося в среде фоторезиста, в которой плотность мощности достигает некоторого порогового значения, когда происходит требуемая модификация свойств фоторезиста (говоря иначе, его экспозиция). По мере удаления от фокальной плоскости объектива увеличивается поперечное сечение пучка. Как следует из (1), в поперечных сечениях пучка имеет место довольно быстрое уменьшение значения плотности мощности. В результате резко сокращаются области сечений, сохраняющие условия для экспонирования фоторезиста. В случаях когда фокусировка производится на поверхность фоторезиста, пространство, в котором обеспечивается его экспонирование, начинается от фокального пятна и простирается внутри фоторезиста симметрично оптической оси излучения. Совокупность сечений, принадлежащих пространству, получила название экспонирующего конуса (или экспонирующего колокола). Если при этом имеет место движение фоточувствительного слоя, то размеры областей, обеспечивающих условия экспонирования фоторезиста, изменяются обратно пропорционально скорости движения слоя. На рис. 1, а приведены результаты расчёта профиля следа, возникающего при взаимодействии лазерного УФ-излучения с длиной волны $\lambda = 0,325$ мкм и фоточувствительного материала при соотношении $f/R = 40$ и различных скоростях движения слоя, выполненные в [8]. Из графиков следует, что, например, при скорости движения слоя порядка 50 мкм/с происходит формирование треугольной (в поперечном сечении) канавки, ширина которой около 4 мкм и глубина порядка 5 мкм. При скорости записи порядка 40 мкм/с крутизна скатов в среднем составляет 58° , что соответствует физической протяжённости ската дорожки порядка 3,1 мкм.

Подобный анализ крутизны скатов при прямой записи, выполненный для других типов объективов, даёт аналогичный результат (рис. 1, б). Из этих расчётов следует, что, как и заявлялось в [1], для традиционных способов прямой лазерной записи фазовых профилей

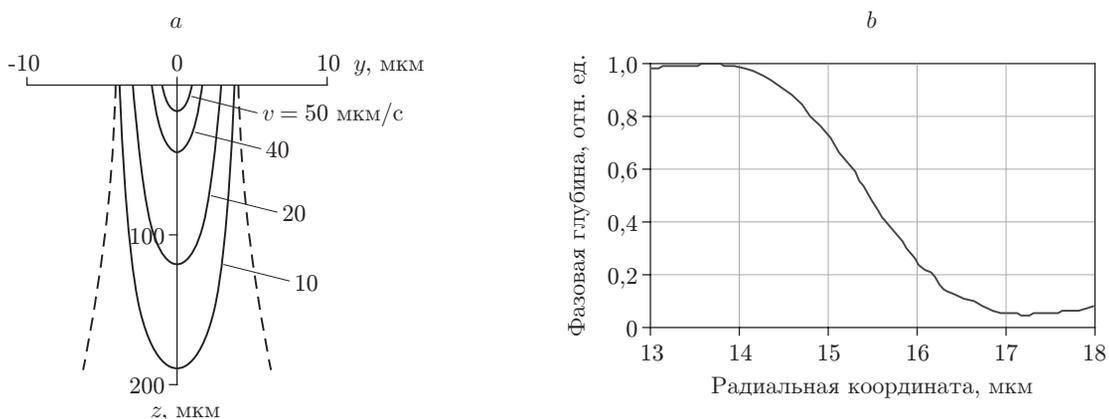


Рис. 1. Профили следов взаимодействия лазерного излучения и фоточувствительного материала: *a* — расчётный профиль следа взаимодействия лазерного излучения [8], *b* — экспериментально зарегистрированный профиль обратного ската ДОО с кусочно-непрерывным профилем [9]

киноформных линз имеются существенные затруднения в попытках обострения крутизны обратных скатов границ зон и улучшения их дифракционной эффективности.

Из второго постулата следует не совсем очевидный вывод о том, что для повышения дифракционной эффективности записываемых структур целесообразно уменьшить диаметр лазерного пучка до размеров, в 2–3 раза меньших входной апертуры микрообъектива головки записи. Дальнейший анализ процедуры записи объёмных структур в предлагаемой работе выполнен для случая, когда диаметр лазерного пучка с помощью диафрагмы уменьшен в 2 раза по сравнению с входной апертурой объектива, а сам луч смещён в сторону относительно оси объектива на половину радиуса входной апертуры. Ход лучей в среде фоторезиста для данного случая представлен на рис. 2. Поскольку после диафрагмирования и смещения луч лазера остался параллельным оптической оси микрообъектива,

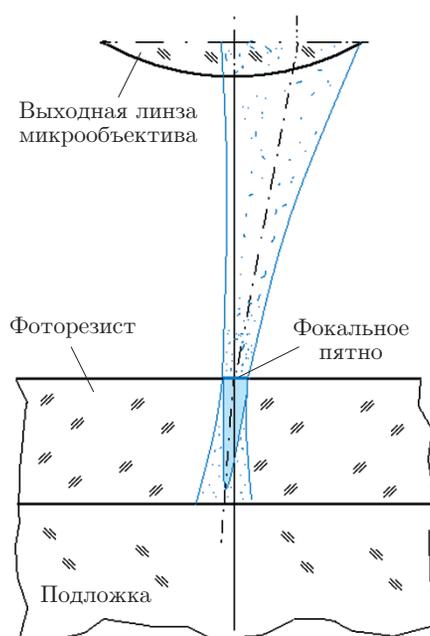


Рис. 2. Формирование в фоторезисте экспонирующего конуса при наклонном падении лазерного излучения

в фокальной плоскости он концентрируется в окрестности его оптической оси. При таком ходе луча фокальное пятно на поверхности фоторезиста представляет собой слегка искажённый эллипс, малая полуось которого может быть определена из (1) как $2r_{0\min}$.

Дальнейший ход лучей в среде фоторезиста определяется его показателем преломления. Но в любом случае оптическая ось луча в среде фоторезиста отклоняется от вертикали, в результате чего вершина экспонирующего конуса (колокола), совпадающая с оптической осью пучка, также отклоняется от вертикали. В связи с тем, что основание конуса сформировано фокальным пятном на поверхности фоторезиста, образующие конуса по отношению к вертикали располагаются асимметрично, причём угол наклона одной из них приближается к вертикали. Если формирование фазового профиля дифракционных зон осуществлять путём последовательного смещения фокального пятна в сторону более пологой образующей и пропорционального управления уровнем подводимой мощности лазерного излучения, то можно ожидать формирование заданного профиля зоны с отвесным задним скатом.

Понятно, что для формирования крутой передней стенки (в случае отрицательных киноформных линз) необходимо предварительно сместить ось лазерного луча в другую сторону относительно оптической оси микрообъектива.

Моделирование записи профиля киноформных линз наклонными пучками в фоторезистах с различными значениями контраста. В [1] упоминалось, что для реализации прямой лазерной записи профилей дифракционных зон киноформных линз требуется использование фоторезистов с малым контрастом. Известно, что типовые значения контраста позитивных фоторезистов лежат в диапазоне 3–20. Для оценки результатов записи профилей киноформных линз наклонными пучками была разработана математическая модель формирования профиля путём экспонирования фоторезиста лазерными пучками произвольной ориентации и последующего селективного травления фоторезистов с различными значениями контраста.

Селективное травление моделировалось в двумерном представлении разбиением зоны травления на элементарные квадратные ячейки со стороной 0,1 мкм. Каждой ячейке с номерами i, j сопоставлена скорость травления $v(I)$ в соответствии с полученной дозой экспозиции $I(i, j)$. Собственно травление моделировалось последовательным уменьшением длин сторон ($A_x(i, j, t)$, $A_y(i, j, t)$) и диагоналей ($A_{xy}(i, j, t)$, $A_{yx}(i, j, t)$) элементарных ячеек, внутри которых скорость травления считается постоянной. Единичный временной интервал Δt был выбран таким, чтобы выполнялось $\Delta t v \ll A_x, A_y, A_{xy}, A_{yx}$. В исходный момент времени ($t = 0$) начинают редуцироваться стороны и диагонали поверхностных ячеек, например $A_y(1, j, \Delta t) = A_y(1, j, 0) - v[I(1, j)]$. Стороны и диагонали последующих ячеек начинают уменьшаться при достижении нулевого или отрицательного значения любого убывающего параметра A_x, A_y, A_{xy}, A_{yx} текущей ячейки. Для анализа динамики процесса травления предусмотрена возможность сохранять поверхностные координаты получающегося профиля для каждого момента времени.

Чтобы убедиться в корректности разработанной математической модели, вначале был выполнен расчёт классического случая, при котором след взаимодействия лазерного излучения формируется в слабоконтрастном фоторезисте при ортогональном падении лазерного излучения на поверхность фоторезиста, осесимметричной ориентации лазерного излучения относительно оптической оси микрообъектива и 100 %-ном заполнении излучением входной апертуры микрообъектива. При этом вначале рассчитывалось распределение экспозиции (поглощённой мощности излучения) в окрестностях фокального пятна (рис. 3, *a*), а затем — динамика травления профиля в объёме слабоконтрастного фоторезиста.

Сравнение получаемых профилей на рис. 3, *b* (особенно профиля оптимальной глубины) с профилями, представленными на рис. 1 (причём на рис. 1, *a* приведён профиль,

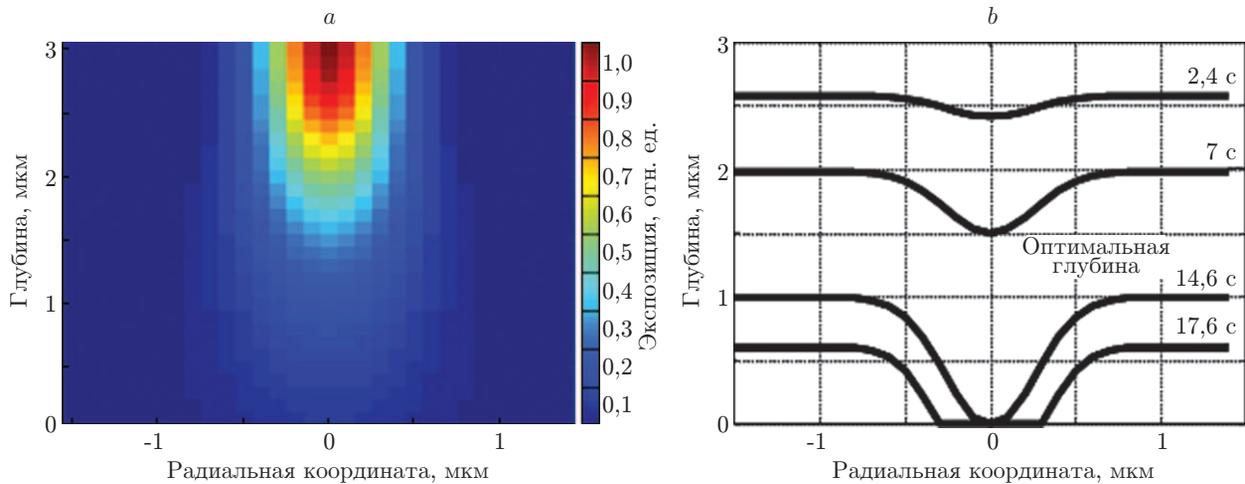


Рис. 3. Формирование профиля следа взаимодействия лазерного излучения со слабоконтрастным фоторезистом при отвесном падении излучения: *a* — распределение энергии пучка в среде фоторезиста, *b* — формирование профиля при травлении экспонированного фоторезиста

рассчитанный по другой методике, а на рис. 1, *b* — экспериментально зарегистрированный профиль обратного ската ДОО с кусочно-непрерывным профилем, измеренный с помощью атомно-силового микроскопа), даёт возможность убедиться в том, что используемая модель адекватно описывает процесс формирования профиля синтезируемой канавки. Отмечено также, что протяжённость скатов следа взаимодействия составляет половину эффективного диаметра фокального пятна, что характерно и для экспериментально регистрируемых профилей.

Затем было выполнено моделирование следа взаимодействия в классическом варианте, но с диафрагмированием входного пучка. Характер сформированных профилей представлен на рис. 4. Как видно, при диафрагмировании рабочего излучения диаметр сфокусированного пятна на поверхности слоя вырос практически в 1,5 раза, увеличилась также и высота экспонирующего конуса (рис. 4, *a*), что привело к заметному повышению кру-

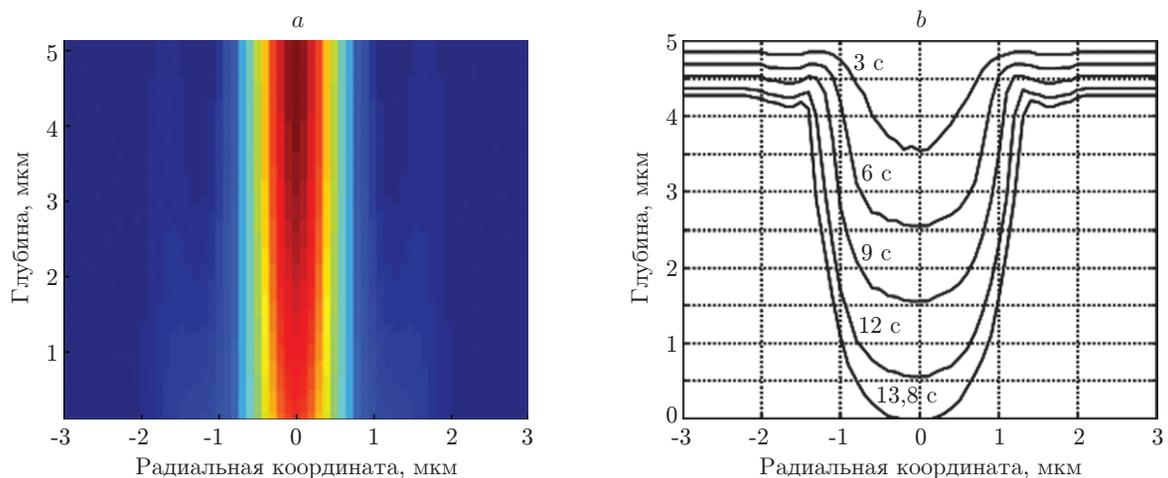


Рис. 4. Формирование профиля следа взаимодействия лазерного излучения со слабоконтрастным фоторезистом при отвесном падении диафрагмированного излучения: *a* — распределение энергии пучка в среде фоторезиста, *b* — формирование профиля при травлении экспонированного фоторезиста

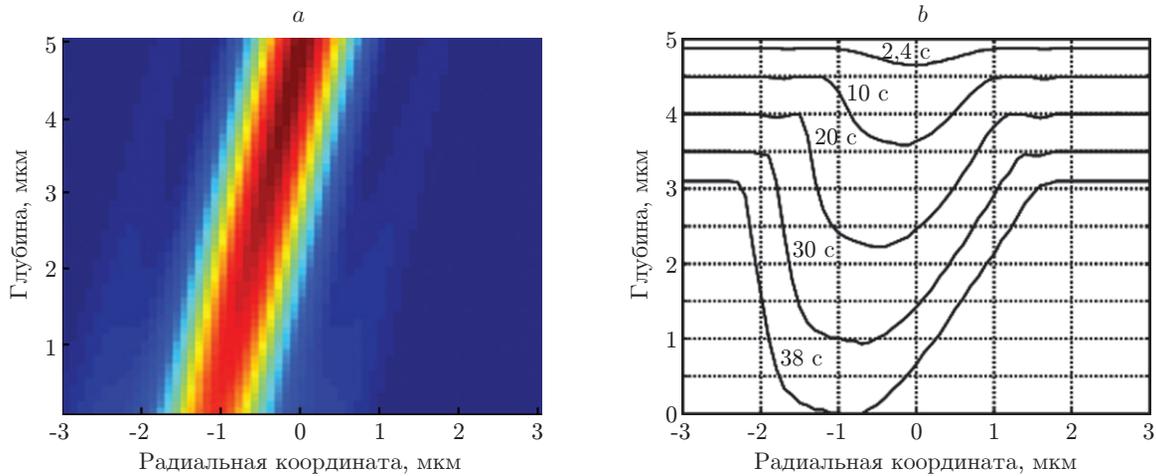


Рис. 5. Формирование профиля следа взаимодействия лазерного излучения со слабоконтрастным фоторезистом при наклонном падении диафрагмированного излучения: *a* — распределение энергии пучка в среде фоторезиста, *b* — динамика формирования профиля

тизны скатов (рис. 4, *b*). Таким образом, используемая математическая модель адекватно описывает то, что и должно происходить реально из-за увеличения глубины резкости фокусировки. Но в целом характер протравленного профиля канавки принципиально не изменился.

Выполненное сравнение получаемых профилей следов взаимодействия лазерного излучения с фоторезистами указывает на соответствие описания с помощью использованной математической модели известных технологических процессов, что позволяет надеяться также на правильность описания особенностей формирования наклонными пучками профилей киноформных линз.

На рис. 5, *a* приведены результаты расчёта экспонирования слабоконтрастного фоторезиста ($k = 3$) излучением лазера, диафрагмированного до половины диаметра входной апертуры и смещённого относительно оптической оси микрообъектива на половину радиуса входной апертуры. Смещение диафрагмированного входного излучения относительно оптической оси микрообъектива приводит к наклону оси излучения, выходящего из микрообъектива и далее экспонирующего фоторезист. Соответственно ось возникшего экспонирующего конуса также отклоняется от нормали (см. рис. 5, *a*). Моделирование процесса травления фоторезиста выявляет при такой записи заметную асимметрию скатов результирующего профиля в слабоконтрастном фоторезисте (рис. 5, *b*). По сравнению с ортогональным падением излучения крутизна левого ската практически в 2 раза стала круче, чем при ортогональном падении. При этом крутизна правого склона почти в 5 раз меньше крутизны левого.

Результаты моделирования подтвердили исходную гипотезу, изложенную в [7]. Следующий модельный эксперимент, выполненный со среднеконтрастным ($k = 10$) фоторезистом, однозначно указал на перспективность использования наклонных пучков при записи профилей киноформных линз в более контрастных фоторезистах.

На рис. 6 представлены результаты моделирования процесса записи наклонным пучком профиля киноформа в среднеконтрастном фоторезисте. При совершенно одинаковых параметрах экспозиции слоёв (см. рис. 5, *a* и 6, *a*) проявленный в среднеконтрастном фоторезисте профиль существенно отличается от соответствующего профиля в слабоконтрастном фоторезисте. Моделирование показывает, что сразу же после начальной фазы травления возникающий профиль стал выявлять устойчивую тенденцию формирования

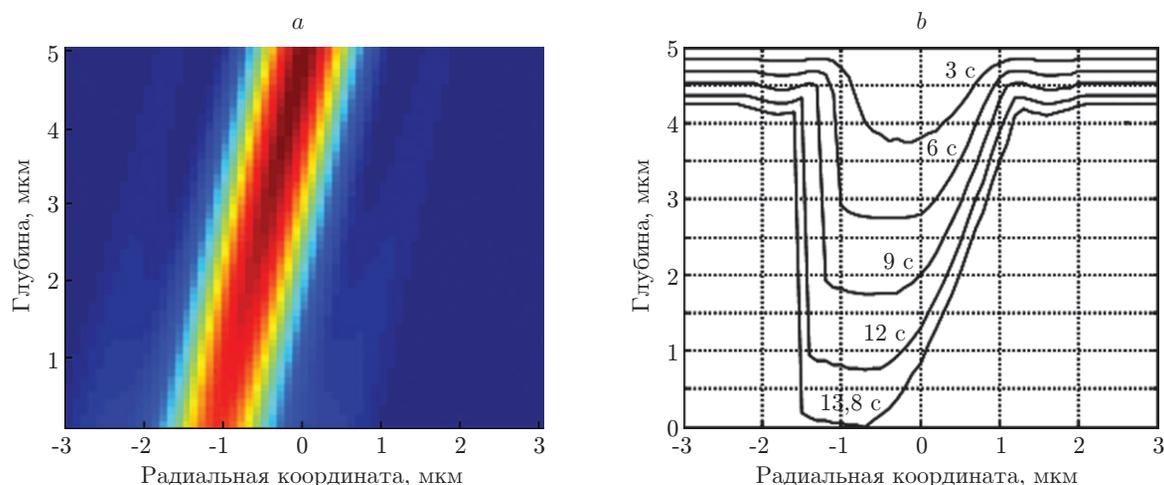


Рис. 6. Формирование профиля следа взаимодействия лазерного излучения со среднеконтрастным фоторезистом при наклонном падении диафрагмированного излучения: *a* — распределение энергии пучка в среде фоторезиста, *b* — динамика формирования профиля

отвесной стенки следа взаимодействия (рис. 6, *b*). На конечных стадиях травления крутизна заднего склона следа взаимодействия приближается к 90° .

Таким образом, модельный эксперимент указывает на то, что применение среднеконтрастных фоторезистов при использовании технологии записи наклонными пучками позволяет формировать в них за одну технологическую операцию дифракционные зоны с практически отвесными стенками.

Заключение. Результаты модельных экспериментов однозначно указывают на перспективность использования технологии записи объёмных профилей киноформных линз наклонными лазерными пучками, с помощью которых за одну технологическую операцию формируются профили дифракционных зон с практически отвесными стенками. При этом процедура записи наклонными пучками отличается технически от классической записи только предварительным диафрагмированием исходного рабочего излучения и параллельным сдвигом лазерного луча относительно оптической оси записывающего микробиоъектива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Корольков В. П.** Чувствительность оптимизированного метода контурной маски к ошибкам процесса изготовления ДОЭ с кусочно-непрерывным рельефом // *Автометрия*. 2014. **50**, № 1. С. 9–19.
2. **Gale M. T., Rossi M., Pedersen J., Schuetz H.** Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists // *Opt. Eng.* 1994. **33**, N 11. P. 3556–3566.
3. **Korolkov V., Shimansky R., Cherkashin V., Denk D.** Computer controlling of writing beam in laser microfabrication of diffractive optics // *Компьютерная оптика*. 2002. Вып. 23. С. 33–39.
4. **Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Shimansky R. V.** Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements // *Appl. Opt.* 2006. **45**, N 1. P. 53–62.
5. **Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Shimansky R. V.** Optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements // *Proc. of the Intern. Conf. on Laser, Applications, and Technologies*. 2007. Vol. 6732. 6732OP.
6. **Pat. 6930834 US.** Method of manufacturing diffractive optical elements /M. Ogusu, Y. Iwasaki. Publ. 16.08.2005.

7. **Пат. 2498360 РФ.** Способ прямой лазерной записи киноформных линз в толстых слоях фото-чувствительных материалов типа фоторезистов (варианты) /В. П. Кирьянов, В. Г. Никитин. Оpubл. 10.11.2013, Бюл. № 31.
8. **Maruo Sh., Ikuta K.** Submicron stereo-lithography for the production of freely moveable mechanisms by using single-photon polymerization // Sensors and Actuators. 2002. **100**, N 1. P. 70–76.
9. **Никитин В. Г.** Исследование кинетики процессов круговой лазерной записи в пленках хро-ма при изготовлении дифракционных оптических элементов и контроль их эффективности: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2007. 133 с.

Поступила в редакцию 4 мая 2017 г.
