

06.1;06.3;12.2

Глубокая 3D-рентгенолитография на основе высококонтрастного рентгенорезиста

© В.П. Назьмов

Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: V.P.Nazmov@inp.nsk.suПоступило в Редакцию 17 мая 2019 г.
В окончательной редакции 27 мая 2019 г.
Принято к публикации 3 июня 2019 г.

В классической рентгеновской литографии рентгеновская маска и слой резиста располагаются перпендикулярно рентгеновскому лучу, который, поглощаясь в слое резиста, инициирует вдоль своего пути отклик в форме, соответствующей его поперечному сечению. Однако наклон и поворот маски/резиста, а также несколько экспозиций, проведенных последовательно, позволяют создать реальную трехмерную форму с точностью лучше микрометра. Описаны подходы к созданию реальных трехмерных микроструктур методом глубокой рентгеновской литографии, позволяющие формировать из них относительно большие массивы.

Ключевые слова: рентгеновская литография, двойное облучение, контрастность.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.18.48227.17879

Различные трехмерные микроструктуры, например чешуйки самой быстрой известной в настоящее время акулы-мако [1], волокна на лапках геккона [2], микротекстура метаматериалов [3] и т.д., могут улучшить реальные свойства или придать новые существующим объектам в гидроаэродинамике, механике, электродинамике и других областях. Вследствие небольшого размера одной микроструктуры для получения определяющего физического эффекта требуется много подобных функциональных микроструктур. В отличие от стереолитографии [4], основанной на последовательном воздействии сфокусированного лазерного луча на каждый элементарный объем модифицируемого материала, метод трехмерной глубокой рентгеновской литографии, предлагаемый в настоящей работе, обеспечивает воспроизведение изображений, соответствующих размеру топологии на рентгеновской маске, которая может содержать много тысяч эталонных микроструктур. Ранее в работах по рентгенолитографии создание сложных форм базировалось либо на суперпозиции двумерных микроструктур [5], либо на вариации дозы, результатом чего явились примитивные трехмерные микроструктуры [6]. Предложенный вместо фотолитографии при изготовлении СБИС (сверхбольших интегральных схем) метод рентгеновской литографии [7] был позже развит до формирования микроструктур с высоким аспектным соотношением и широким спектром предназначений [8]. Сформированные с субмикронной точностью на большой площади массивы микроструктур могут быть предложены в качестве элементов устройств управления оптическим излучением и хранения информации [9], широкоапертурных рентгеновских линз [10] и т.д. Однако размер структур можно контролировать лишь в двух измерениях, что не позволяет изготавливать, например, микропризмные отражатели — катафоты или высокоэффективные антенные структуры фазированных

антенных решеток [11]. Предложенный в настоящей работе подход позволяет формировать более сложные структуры на площади, обеспечиваемой шириной рентгеновского пучка синхротронного излучения (СИ) в несколько сантиметров.

Как и в классической рентгеновской литографии, перенос изображения осуществляется в режиме 1:1. Однако в отличие от воздействия одиночного рентгеновского луча в нашем исследовании сложное трехмерное распределение дозы формируется в слое резиста вследствие наложения дозовых распределений, создаваемых двумя лучами рентгеновского излучения, пересекающимися под углом 90° друг к другу (рис. 1). Результирующее распределение дозы преобразуется в трехмерный профиль после жидкостного проявления высококонтрастного рентгеновского резиста *mrx* (производства компании MRT). Его высокая контрастность и высокое пространственное разрешение обусловлены эффективным сшиванием преполимерных молекул в пределах небольшого изменения дозы вблизи величины пороговой дозы [12].

Использование двухлучевого облучения позволило сформировать реальные трехмерные микроструктуры в слое резиста толщиной $200\ \mu\text{m}$ (рис. 2, *a*). Суммарная доза D_2 поглощенного в материале резиста излучения составила $36\ \text{J}/\text{cm}^2$, что соответствует длительности воздействия около 1 мин для рентгеновских лучей, генерируемых источником СИ ВЭПП-3 для станции LIGA [13].

Чтобы свести к минимуму фоновую дозу D_1 в верхних слоях резиста, нами было испытано двустороннее облучение (рис. 1, *b*): с тыльной стороны рентгеновский луч облучает слой резиста сквозь подложку, изготавливаемую из полиимидной фольги толщиной $25\ \mu\text{m}$. На рис. 2, *b* показан массив 3D-микроструктур пирамидальной формы (нижний уровень), сформированных двусторонним облучением. Поверх нижнего уровня сформиро-

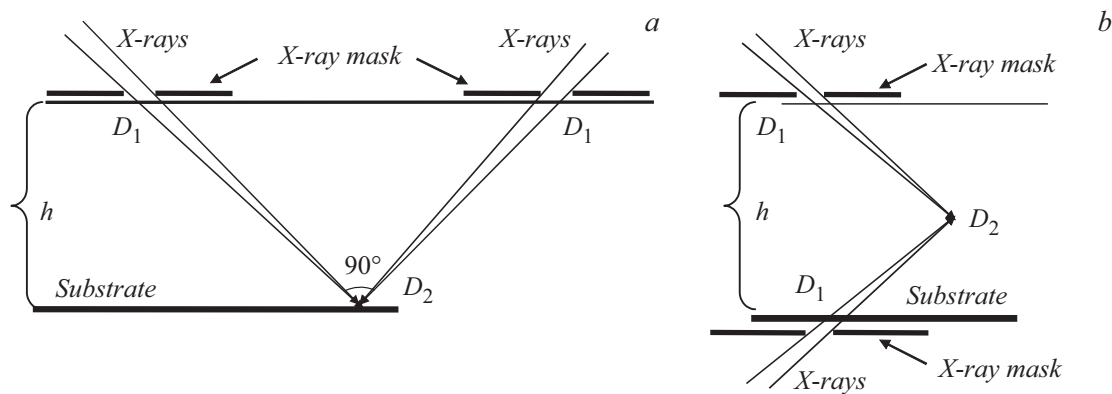


Рис. 1. Схема двухкратной экспозиции слоя резиста толщиной h . a — с одной стороны, b — с двух сторон.

ван путем односторонних облучений верхний уровень, представляющий собой массив микротетраэдров.

В целях миниатюризации переносимое изображение рентгеновской маски может быть уменьшено с помощью

преломляющей рентгеновской линзы [14], но поле зрения линзы составляет лишь десятки микрометров. Поэтому для переноса уменьшенного изображения элементов на площади, сравнимой с размером рентгеновской маски, маска помещалась на расстоянии $L \approx 0.33A^2/\lambda$ от слоя резиста (λ — длина волны, A — размер топологического отверстия на рентгеновской маске), при котором наблюдается локальная концентрация освещения вследствие дифракции рентгеновского излучения на краях топологических элементов маски, как предложено в [15]. Например, при монохроматическом когерентном освещении поперечный размер (FWHM) скрытого изображения за щелью шириной A составляет $\sim 1.1\lambda L/A$, что в 2.8 раза меньше размера на маске, а выигрыш в освещенности G достигает величины 3.2. Вдобавок поперечный размер элементов воспроизводимого изображения может быть уменьшен в γ раз с учетом дозовой функции растворимости резиста, крутизна которой описывается параметром контрастности γ [16].

Расчет минимального резистивного элемента был проведен для $A = 900 \text{ nm}$, $\lambda = 2.5 \text{ \AA}$ и $L = 1070 \mu\text{m}$. Несмотря на протяженную дозовую функцию (рис. 3, a), боковые стенки моделируемого профиля близки к вертикальным. Чтобы минимизировать остатки резиста, генерируемые от сложения паразитных доз за пределами скрытого изображения актуального топологического элемента, величина контрастности резиста должна быть выше чем $\gamma = 2.3/[\ln(2G) - 1.41\mu h]$, где μ — коэффициент линейного поглощения резиста на длине волны λ , а h — толщина резистивного слоя (рис. 3, b). Минимальное значение контрастности уменьшается с увеличением длины волны вследствие более низкого коэффициента поглощения, а величина контрастности резиста mrx может достигать девяти [12].

Полученные массивы микроструктур могут быть использованы в качестве функциональных оптических, гидроаэродинамических и других элементов, а также матриц для последующего формирования функциональных слоев [17].

В дальнейшем использование рентгеновских масок с различной топологией позволит разнообразить результирующее скрытое изображение в слое резиста.

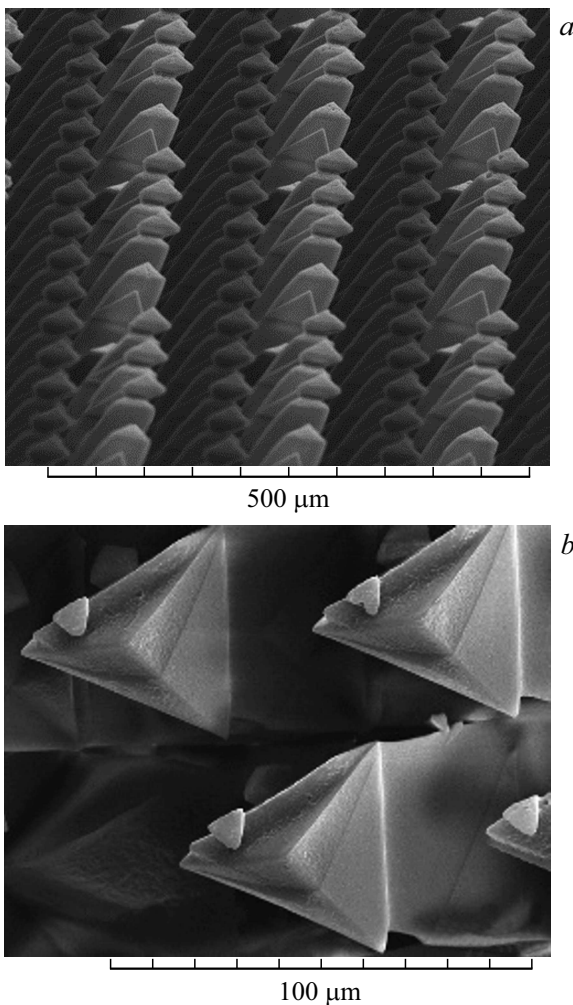


Рис. 2. 3D-микроструктуры, изготовленные в слое резиста mrx толщиной $200 \mu\text{m}$. a — зубчатые микроиглы, b — двухуровневая микроструктура.

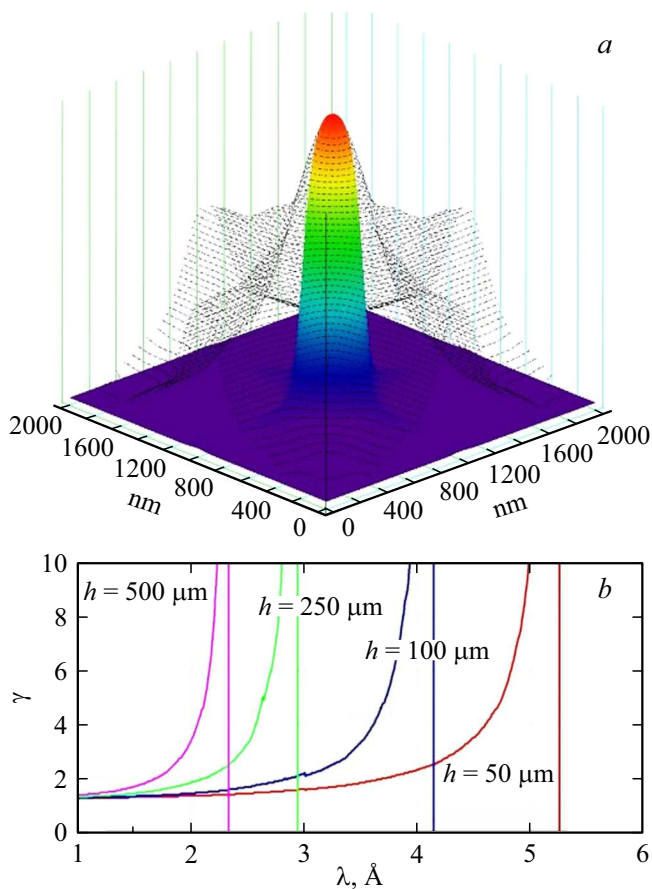


Рис. 3. *a* — расчетное распределение дозы в материале резиста (с учетом диссипации энергии за счет фотоэлектронов) (пунктир) и профиль оставшегося резиста после удаления неполимеризованного материала (сплошная линия), *b* — расчетный минимальный контраст в зависимости от длины волны рентгеновского излучения для различной толщины слоя резиста.

Следует отметить, что, поскольку радиационно-индуцированная температура влияет на чувствительность резиста [18], можно варьировать топологию формируемых трехмерных структур посредством задания мощности рентгеновских пучков.

Таким образом, в работе предложен метод изготовления с субмикронной точностью реальных трехмерных микроструктур высотой до нескольких сотен микрометров на площади до нескольких квадратных сантиметров с относительно высокой производительностью. Предлагаемый метод базируется на применении высококонтрастных рентгеночувствительных материалов.

Благодарности

Часть исследований, касающаяся экспонирования образцов, выполнена с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования „Сибирский синхротронный и терагерцевый радиационный центр“ на базе

источника СИ ВЭПП-3 в Институте ядерной физики СО РАН.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 19-42-540014 p_a).

Список литературы

- [1] Domel A., Saadat M., Weaver J., Haj-Hariri H., Bertoldi K., Lauder G. // J. R. Soc. Interface. 2018. V. 15. P. 20170828.
- [2] Autumn K., Liang Y., Hsieh S., Zesch W., Chan W., Kenny T., Fearing R., Full R. // Nature 2000. V. 405. P. 681–685.
- [3] Lu Y., Yang Y., Guest J., Srivastava A. // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 43407.
- [4] Bertsch A., Renaud P. Microstereolithography // Three-dimensional microfabrication using two-photon polymerization: fundamentals, technology, and applications / Ed. T. Baldacchini. Amsterdam: Elsevier, 2015. P. 47–71.
- [5] Feiertag G., Ehrfeld W., Freimuth H., Kolle H., Lehr H., Schmidt M., Sigalas M.M., Soukoulis C.M., Kiriakidis G., Pedersen T., Kuhl J., Koenig W. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 1441–1443.
- [6] Horade M., Sugiyama S. // Microsyst. Technol. 2010. V. 16. P. 1331–1338.
- [7] Spears D.L., Smith H.I. // Electron. Lett. 1972. V. 8. P. 102–104.
- [8] LIGA and its applications, advanced micro & nanosystems. V. 7 / Eds V. Saile, U. Wallrabe, O. Tabata, J. Korvink. Weinheim: WILEY-VCH GmbH, 2009. 480 p.
- [9] Асадчиков В.Е., Бедин С.А., Васильев А.Б., Григорьев Ю.В., Назьмов В.П. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 5. С. 49–51.
- [10] Simon M., Reznikova E., Nazmov V., Last A., Jark W. // Proc. SPIE. 2008. V. 7077. P. 70771Q. DOI: 10.1117/12.795423
- [11] Фёдоров С.М. Сверхширокополосные линзовые антенны с коммутационным сканированием в азимутальной плоскости. Канд. дис. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2013. 146 с.
- [12] Kunka D., Mohr J., Nazmov V., Meiser J., Meyer P., Amberger M., Koch F., Schulz J., Walter M., Duttenhofer T., Voigt A., Ahrens G., Grützner G. // Microsyst. Technol. 2014. V. 20. P. 2023–2029.
- [13] Гольденберг Б.Г., Лемзяков А.Г., Зелинский А.Г., Назьмов В.П., Пиндюрин В.Ф. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 1. С. 64–67.
- [14] Schroer C., Benner B., Güzler T., Kuhlmann M., Zimprich C., Lengeler B., Rau C., Weitkamp T., Snigirev A., Snigireva I., Appenzeller J. // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73. P. 1640–1642.
- [15] Bourdillon A., Boothroyd C., Williams G., Vladimirov Y. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V. 36. P. 2471–2482.
- [16] Валуев К.А. // Физика субмикронной литографии. М.: Наука, 1990. 528 с.
- [17] Schaedler T.A., Jacobsen A.J., Torrents A., Sorensen A.E., Lian J., Greer J.R., Valdevit L., Carter W.B. // Science. 2011. V. 334. P. 962–965. DOI: 10.1126/science.1211649
- [18] Назьмов В., Бергер М., Хайслер С. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 11. С. 3–7.