

Термическое усиление резиста для формирования массивов микролинз и фотонных кристаллов

Ф.А. Сидоров^{1,2}, М.А. Брук¹, Е.Н. Жихарев¹, А.Е. Рогожин^{1,2}

¹Физико-технологический институт РАН, Нахимовский просп. 36/1, Москва, Россия, 117218

²Московский физико-технический институт (Государственный университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Россия, 141701

Аннотация. Термическое усиление резиста – это один из возможных подходов, позволяющих повысить производительность электронно-лучевой литографии. Подход термического усиления резиста основан на процессе деполимеризации, протекающем во время экспонирования позитивных резистов при температурах выше температуры стеклования. Механизм термического усиления имеет много общего с механизмом химического усиления резиста, но термическое усиление резиста можно контролировать, меняя температуру образца. Термическое усиление может существенно упростить формирование ряда оптоэлектронных и фотонных структур. В данной работе рассматривается возможность формирования массивов микролинз и фотонных кристаллов с помощью термического усиления резиста. Также в работе обсуждается влияние термического усиления на латеральное разрешение литографии.

1. Введение

Массивы микролинз и планарные фотонные кристаллы используются во многих приборах [1], например, компонентах цифровых оптических процессоров [2], системах формирования изображений [3], системах оптической связи [4] и конфокальной микроскопии [5, 6]. Однако технология формирования таких структур в ряде случаев оказывается сложной и плохо контролируемой. Существенно упростить технологию формирования таких структур, по всей видимости, можно было бы используя термическое усиление резиста в электронно-лучевой литографии. Этот метод, основанный на сухом электронно-лучевом травлении резиста, позволяет существенно повысить производительность электронно-лучевой литографии и позволяет формировать структуры специфической округлой формы.

2. Сухое электронно-лучевое травление резиста

Метод сухого электронно-лучевого травления резиста (СЭЛТР) основан на протекании в полимерном резисте в процессе экспонирования при температурах, близких к температуре стеклования (или более высоких температурах), электронно-стимулированной цепной реакции деполимеризации с выделением летучих продуктов (мономера), удаляющихся из резиста непосредственно в ходе экспонирования. Метод применим к резистам, способным в указанных выше условиях к эффективной деполимеризации до мономера (ПММА, другие полиметакрилаты, поли-*α*-метилстирол, полиметилизопронилкетон и др.). Метод СЭЛТР позволяет приблизительно в 10–300 раз повысить чувствительность ПММА-резиста в

электронно-литографическом процессе по сравнению с «мокрой» технологией ЭЛ. Метод позволяет также формировать пространственные 3D-структуры с весьма высоким разрешением по вертикали (порядка 2 нм) и низкой шероховатостью поверхности (до 1 нм), что существенно лучше, чем при использовании мокрого метода. Характерной особенностью метода СЭЛТР является скругленная форма стенок полученных структур. К недостаткам этого метода можно отнести невысокое латеральное разрешение (порядка 100–150 нм), низкий контраст изображения (0,7–1,5). При решении задач, для которых требования к этим параметрам не слишком высоки, метод, по-видимому, может представлять значительный практический интерес. АСМ изображения дифракционных решеток, полученных методом СЭЛТР, представлены на рис. 1. Подробно метод СЭЛТР описан, например, в [7].

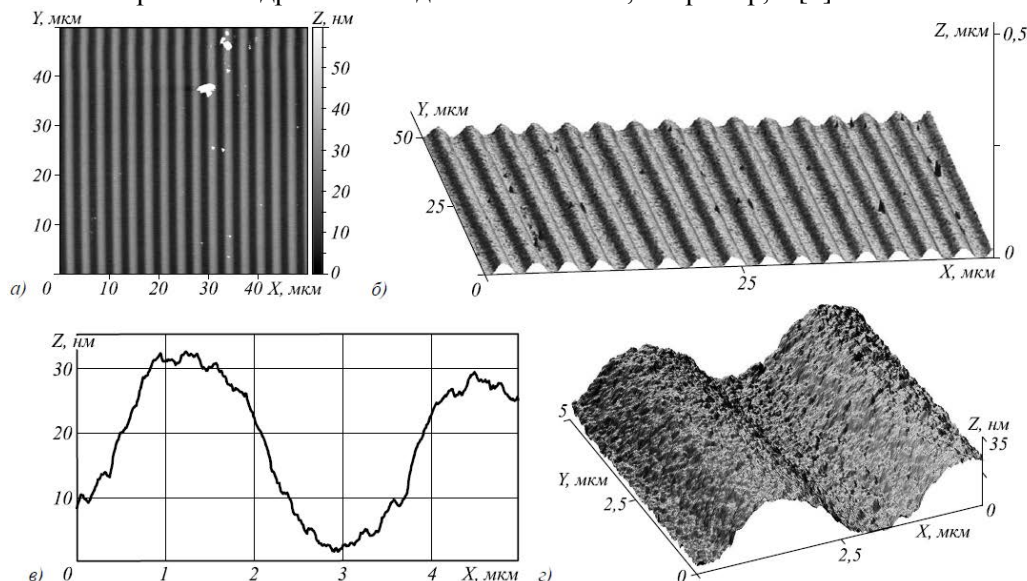


Рисунок 1. Непрерывная структура со скруглённым рельефом и близким к синусоидальному профилю сечения. Экспонирование «в кадр» при 125°С в СЭМ Camscan. Размер кадра – 2×2,6 мм. Энергия электронов $E = 20$ кэВ. Начальная толщина слоя резиста – $L_0 = 80$ нм. Доза, усреднённая по кадру, 0,5 мкКл/см². Топография (а), трёхмерное изображение (б, г), профиль сечения (в).

3. Моделирование сухого электронно-лучевого травления резиста

Для моделирования электронных треков в системе ПММА/Si используется метод «прямого» Монте-Карло [8], основанный на независимом описании основных процессов, протекающих при прохождении электронов с энергией до 20 кэВ через вещество, – упругих взаимодействий, ионизации и генерации вторичных электронов и возбуждении атомов [9]. Сечения упругих процессов получены из моделей, основанных на суммировании парциальных волн при решении уравнения Дирака с учетом параметра экранирования Мольера и интерполированы в область низких энергий (до 10 эВ). Сечения неупругих процессов получены из моделей, основанных на теории Мёллера и приближении Вайцзеккера-Вильямса [10]. Потери энергии рассчитаны из модификаций теории Бете [11]. Полученные вышеописанным образом сечения процессов и потери энергии в них приведены в работе [12]. Приведенные в этой работе данные позволяют также моделировать треки вторичных электронов, возникающих в результате ионизации атомов на основе сечений взаимодействия первичного электрона с электронами на различных оболочках атомов, энергии связи для оболочек атомов и законов сохранения энергии и импульса (рис. 2).

Каждое взаимодействие электрона с атомами ПММА определяется с помощью набора случайных чисел, полученных из равномерного распределения на отрезке [0, 1]. Первое случайное число используется для определения типа атома ПММА ((C₅H₂O₈)_n) при известных полных сечениях взаимодействия электрона с атомами углерода, водорода и кислорода. Второе

случайное число позволяет определить тип взаимодействия (упругое рассеяние, возбуждение или ионизация с взаимодействием первичного электрона с электроном одной из оболочек атома) при известных сечениях этих процессов для каждого атома.

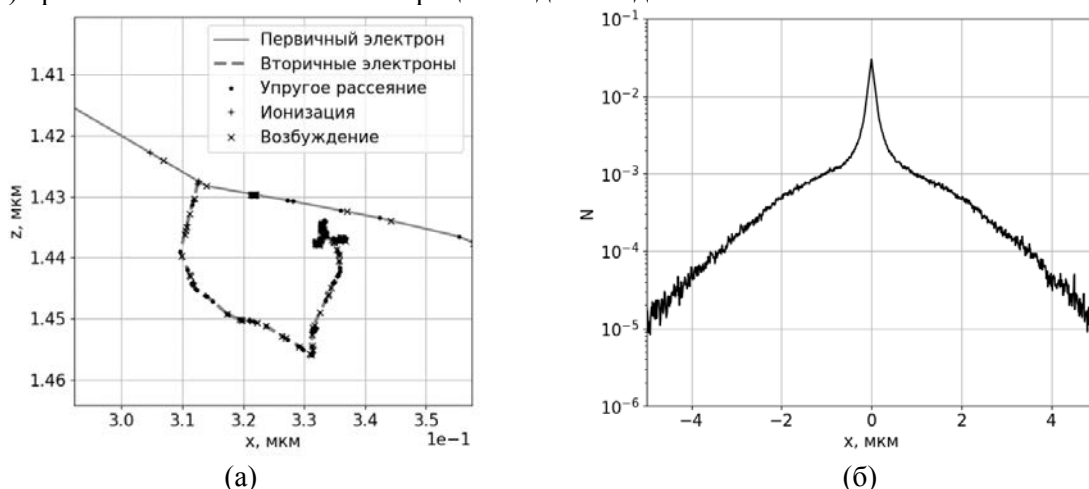


Рисунок 2. (а) Часть рассчитанной траектории первичного электрона с отмеченными актами рассеяния по разным механизмам: упругого рассеяния, ионизации атомов и генерации вторичных электронов, возбуждений; (б) рассчитанное распределение количества актов неупругого рассеяния первичных (с энергией 20 кэВ) и вторичных электронов в слое ПММА толщиной 900 нм.

Третье случайное число (μ_3) определяет расстояние до точки, в которой произойдет следующее взаимодействие (Δs) по формуле $\Delta s = -\lambda \ln(\mu_3)$, где длина свободного пробега (λ) рассчитывается из концентрации атомов и полного сечения взаимодействия [13]. В случае упругих взаимодействий генерируются два дополнительных числа для определения полярного и азимутального угла рассеяния при известных дифференциальных сечениях [11, 12, 13], в случае ионизации – одно дополнительно число для определения энергии вторичного электрона при известном спектре вторичных электронов для каждой оболочки каждого атома.

Пользуясь кинетической кривой сухого электронно-лучевого травления резиста для соответствующей температуры и сравнивая форму распределения количества актов рассеяния электронов в резисте с формой канавки, полученной с помощью термического усиления резиста (рис. 3), можно заключить, что форма канавки и латеральное разрешение не объясняются в полной мере рассеянием электронов. По всей видимости, существенное влияние оказывают другие механизмы [14].

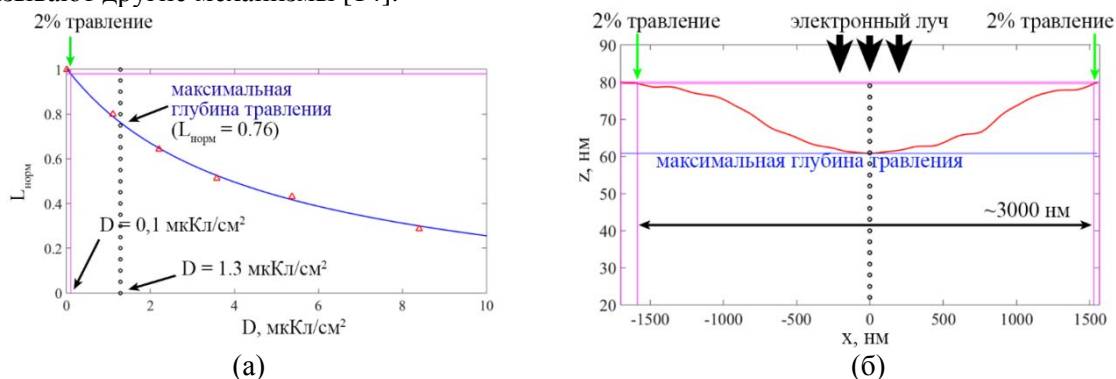


Рисунок 3. (а) Кинетическая кривая сухого электронно-лучевого травления ПММА (энергия электронов - 20 кэВ; толщина резиста - 80 нм; температура - 116°C) и (б) АСМ профиль канавки полученной с помощью термического усиления резиста в системе Samscan при тех же параметрах.

4. Формирование структур фотонных кристаллов с помощью термического усиления резиста

С помощью метода термического усиления резиста возможно формирование сложных бинарных решеток и планарных фотонных кристаллов (рис. 4). Показанная на рис. 4 структура была полученная с помощью термического усиления резиста в процессе экспонирования электронным лучом двух серий перпендикулярных линий в резисте ПММА. Некоторая асимметрия элементов структуры связана с различными условиями экспонирования серий. При формировании фотонных кристаллов недостатком может являться специфическая округлая форма элементов структуры, которая может привести к снижению их эффективности.

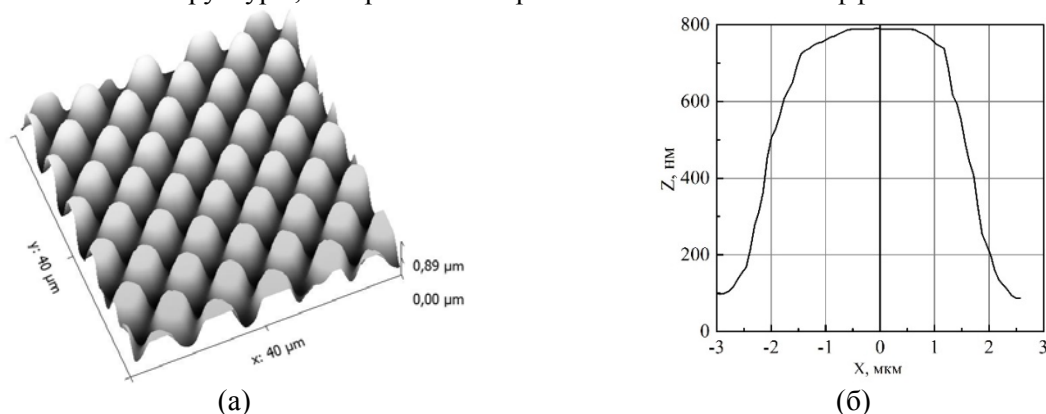


Рисунок 4. (а) Трехмерная реконструкция на основе АСМ изображения структуры, полученной с помощью термического усиления резиста в процессе экспонирования двух серий линий в ПММА; (б) профиль одного из элементов этой структуры.

5. Формирование массивов микролинз с помощью термического усиления резиста

В работе впервые исследовалась возможность формирования микролинз и массивов микролинз с помощью термического усиления резиста. Наборы микролинз формировались в системе Ultra-55 при температуре 128°C (рис. 5). Показано, что в процессе экспонирования формируются микролинзы сферической формы. Необходимо отметить, что в процессе экспонирования рельеф вокруг микролинз меняется, по всей видимости, из-за переосаждения мономера. Необходимо дальнейшее исследование режимов травления для ослабления этого эффекта. Диаметр полученных микролинз около 300 нм. Микролинзы сливаются в линию, если расстояние между составляет менее 750 нм.

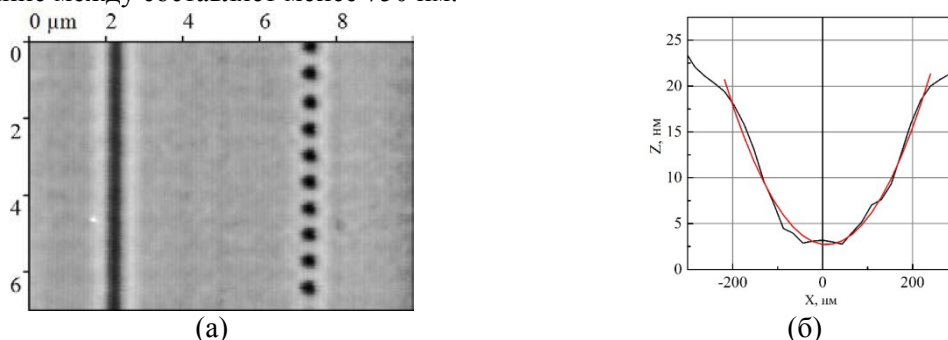


Рисунок 5. (а) АСМ изображение канавки и набора микролинз, полученных с помощью термического усиления резиста в процессе экспонирования при различных условиях; (б) профиль микролинзы и сферическая аппроксимация формы микролинзы.

6. Заключение

Показана возможность формирования планарных фотонных кристаллов и массивов микролинз с помощью термического усиления в процессе экспонирования резиста электронным пучком. Для получения структур необходимой формы требуется анализ влияния параметров процесса на переосаждение мономера и форму структур.

Проведен анализ влияния рассеяния электронов на форму канавки и латеральное разрешение метода. Показано, что рассеяние электронов не описывает в полной мере форму канавки – требуется анализ других процессов – диффузии мономера, передачи цепи, растекания резиста и других.

7. Благодарности

Авторы выражают благодарность совету по грантам при Президенте РФ и Министерству образования и науки РФ за частичную поддержку работы в рамках гранта № МК-3327.2017.9.

8. Литература

- [1] Sinzinger, S. *Microoptics* / S. Sinzinger, J. Jahns // New York: Wiley, 1999.
- [2] Berger, C. A microlens-array-based optical neural network application *Pure* / C. Berger, N. Collings, R. Vokel, M.T. Gale, T. Hessler // *Appl. Opt.* – 1997. – Vol. 6. – P. 683.
- [3] Anderson, R.H. Close-up imaging of documents and displays with lens arrays *Appl. Opt.* – 1997. – Vol. 18. – P. 477.
- [4] McCormick, F.B. Optical interconnections using microlens arrays / F.B. McCormick, A.P. Tooley, T.J. Cloonan, J.M. Sasian, H.S. Hinton, K.O. Merserau, A.Y. Feldblum // *Opt. Quantum Electron.* – 1991. – Vol. 24. – P. S465.
- [5] Tiziani, H.J. Chromatic confocal microscopy with microlenses / H.J. Tiziani, R. Achi, R.N. Kramer // *J. Mod. Opt.* – 1996. – Vol. 43. – P. 155.
- [6] Fujita, K. Real-time confocal two-photon fluorescence microscope using a rotating microlens array / K. Fujita, T. Kaneko, O. Nakamura, M. Oyamada, T. Takamatsu, S. Kawata // *Proc. SPIE.* – 1999. – Vol. 3740. – P. 390.
- [7] Kotera, M. A Simulation of Electron Scattering in Metals / M. Kotera, R. Ijichi, T. Fujiwara, H. Suga, D.B. Witty // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 1990. – Vol. 29(1). – P. 2277.
- [8] Bruk, M.A. Formation of micro- and nanostructures with well-rounded profile using a new e-beam lithography principle / M.A. Bruk, E.N. Zhikharev, A.E. Rogozhin, D.R. Streltsov, V.A. Kalnov, S.N. Averkin, A.V. Spirin // *Microelec. Eng.* – 2016. – Vol. 155. – P. 92-96. DOI: 10.1016/j.mee.2016.03.017
- [9] Han, G. Comprehensive model of electron energy deposition / G. Han, M. Khan, Y. Fang, F. Cerrina // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 2002. – Vol. 20. – P. 6.
- [10] Jackson, J.D. *Classical Electrodynamics* / J.D. Jackson // Wiley Press, 1975. – 719 p.
- [11] Seltzer, S.M. Private communication. National Institute of Standards and Technology / S.M. Seltzer // Gaithersburg, MD, 1988.
- [12] Cullen, D.E. The Evaluated Photon and Electron Data Library (Z = 1-100) / D.E. Cullen, J.H. Hubbell, K. Kissel // *EPDL97: Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-50400.* – 1997. – Vol. 6(5).
- [13] Dapor, M. *Electron-Beam Interactions With Solids Application of the Monte Carlo Method to Electron Scattering Problems* / M. Dapor // Springer tracts in modern physics. – 2003. – P. 186.
- [14] Kuhr, J.Ch. Monte-Carlo simulation of low energy electron scattering in solids / J.Ch. Kuhr, H.J. Fitting // *Phys. Stat. Sol. A.* – 1999. – Vol. 172. – P. 433-449.
- [15] Rogozhin, A. Nanophotonic structure formation by dry e-beam etching of the resist: resolution limitation origins / A. Rogozhin, M. Bruk, E. Zhikharev, F. Sidorov // *Computer Optics.* – 2017. – Vol. 41(4). – P. 499-503. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-499-503.

Fabrication of microlens arrays and planar photonic crystals using thermal amplification of resist

F.A. Sidorov^{1,2}, M.A. Bruk¹, E.N. Zhikharev¹, A.E. Rogozhin^{1,2}

¹Institute of Physics and Technology of RAS, 36/1 Nakhimovsky av., Moscow, Russia, 117218

²Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky per., Dolgoprudny, Russia, 141701

Abstract. Thermal amplification of resist could be one of possible approaches to improve throughput of e-beam lithography. Thermal amplification is based on the chain depolymerization, which takes place in the resist during e-beam exposure at the glass-transition or higher temperatures. It has lots in common with chemical amplification but can be controlled by changing the temperature. Using thermal amplification of resist it is possible to fabricate optoelectronic and photonic structures effectively. In this work the microlens arrays and photonic crystals fabricated using thermal amplification are presented. Also influence of thermal amplification on lateral resolution is discussed.

Keywords: Thermal amplification, DEBER, microlens, nanophotonics.