

Моделирование процесса формирования микрооптических структур методом термостимулированной электронно-лучевой литографии

Ф.А. Сидоров

Физико-технологический институт имени К.А. Валиева
РАН

Москва, Россия

fedor.sidorov@phystech.edu

А.Е. Рогожин

Физико-технологический институт имени К.А. Валиева
РАН

Москва, Россия

rogozhin@ftian.ru

Аннотация—В данной работе описывается физическая модель высокопроизводительного метода формирования микрооптических структур – термостимулированной электронно-лучевой литографии, а также алгоритм моделирования профиля линии, получаемой этим методом. В модели учитываются электронно-стимулированные разрывы молекул резиста, их деполимеризация, диффузия мономера и процессы растекания. Моделирование профиля линии, получаемой данным методом, показало, что профиль линии существенным образом определяется неоднородным распределением молекулярной массы и вязкости резиста. Из сравнения экспериментальных и промоделированных профилей были определены зависимости длины цепи деполимеризации и вязкости резиста от его молекулярной массы при различных температурах.

Ключевые слова— термостимулированная электронно-лучевая литография, микрооптические структуры, термическая деполимеризация.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существующие в настоящее время методы формирования 3D-структур со сглаженным профилем (в том числе микрооптических структур - синусоидальных дифракционных решеток, фотонных кристаллов и др.), помимо очевидных преимуществ имеют ряд недостатков. К последним можно отнести, например, большое время экспонирования и сложность процесса получения изображения (в случае полутонковой электронно-лучевой и фотолитографии с дальнейшим оплавлением резиста), дороговизну оборудования и его конечный ресурс (в случае использования штампов для нанопринтной литографии). Ввиду этого внимания заслуживает сравнительно новый метод термостимулированной электронно-лучевой литография [1], основанный на экспонировании позитивных полимерных резистов при температуре выше температуры стеклования. В нем электронно-стимулированные разрывы молекул резиста при повышенной температуре инициируют цепную реакцию деполимеризации, что приводит к появлению в резисте большого количества свободного мономера. Вследствие диффузии он покидает слой резиста, обеспечивая формирование полостей в резисте, которые впоследствии заполняются резистом за счет его усадки. Это приводит к формированию 3D-профиля в резисте непосредственно на стадии экспонирования, при этом характерная доза экспонирования составляет порядка 1-

10 мкКл/см² (в десятки раз меньше, чем в случае «мокрой» литографии). В настоящее время удавалось получить профили с латеральным разрешением до 300 нм, что может быть результатом любого из процессов, протекающих одновременно при реализации данного метода. Таким образом, для определения границ применимости данного метода необходимо составить физическую модель процессов, приводящих к формированию изображения и оценить влияние каждого из них на результирующую форму профиля.

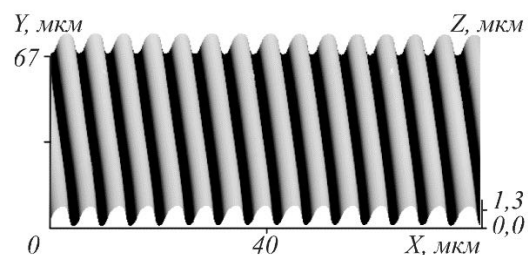


Рис. 1. Пример структуры, полученной в ПММА (полиметилметакрилат) методом термостимулированной электронно-лучевой литографии [1]

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ

Для моделирования профиля линии, получаемой методом термостимулированной электронно-лучевой литографии, были выделены основные процессы, определяющие форму линии – электронно-стимулированные разрывы молекул резиста, их деполимеризация, диффузия мономера и процессы растекания. Рассеяние электронного пучка в резисте и подложке моделировалось с помощью современных подходов на основе функции потерь энергии [2], [3], температурная зависимость радиационно-химического выхода разрывов была определена из сравнения результатов моделирования с экспериментальными результатами [4]. Для моделирования эволюции распределения молекулярной массы резиста в ходе экспонирования была использована кинетическая модель, описанная в работе [5]. Это позволило определить локальное распределение молекулярной массы резиста и, в дальнейшем, длину цепи деполимеризации при каждом разрыве. Считалось, что деполимеризация молекулы резиста приводит к образованию полости в резисте, объем

которой рассчитывался из длины цепи деполимеризации. Учитывая диапазон значений коэффициента диффузии мономеров различных резистов в слое резиста при температурах выше температуры стеклования [6], было установлено, мономер, образовавшийся в результате деполимеризации, в дальнейшем эффективно выходит из слоя резиста (временем выхода мономера можно пренебречь). Моделирование растекания профиля проводилось с использованием аналитического подхода на основе уравнения Навье-Стокса [7] и численного подхода на основе метода конечных элементов с использованием программного обеспечения Surface Evolver [8]. Это позволило учесть неоднородное распределение вязкости резиста, определяемое из локального распределения молекулярной массы.

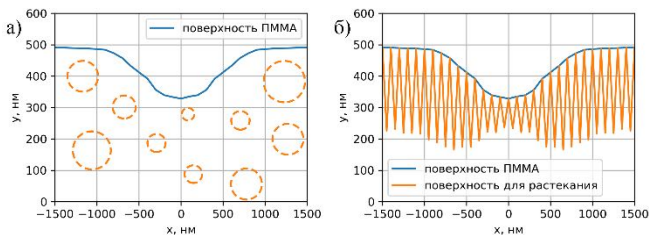


Рис. 2. а) Структура резиста (ПММА, полиметилметакрилат) при экспонировании в методе термостимулированной электронно-лучевой литографии; б) модель однородного резиста с пилообразной поверхностью, используемая на этапе моделирования растекания резиста

При моделировании профиля линии, получаемого в процессе термостимулированной электронно-лучевой литографии, время экспонирования разделялось на промежутки величиной порядка 1с, и в течение каждого промежутка последовательно моделировались вышеописанные процессы. В силу особенностей подхода к моделированию растекания резиста, слой резиста с внутренними полостями на этапе моделирования растекания описывался моделью однородного слоя с пилообразной поверхностью, объем зубьев которой определялся из суммарного объема полостей в резисте (рис. 2). Было установлено, что формирование линии в резисте становится возможным главным образом за счет уменьшения вязкости резиста в области электронного луча, приводящего к более быстрому «затягиванию» полостей, чем на краях линии. На основе сравнения экспериментальных и промоделированных профилей была подтверждена эмпирическая зависимость вязкости резиста от молекулярной массы ($\eta \sim M_w^{3,4}$ [7], M_w –

средневесовая молекулярная масса резиста), а также было установлено что с повышением температуры длина цепи деполимеризации изменяется от десятых долей до половины средней длины молекулы.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приводится описание физической модели метода высокопроизводительного метода формирования микрооптических 3D-структур со сглаженным профилем – термостимулированной электронно-лучевой литографии. Моделирование профиля линии, получаемой данным методом, позволило установить, что профиль линии существенным образом определяется неоднородным распределением молекулярной массы и вязкости резиста. Были определены зависимости длины цепи деполимеризации и вязкости от молекулярной массы резиста при различных температурах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bruk, M.A. A new method of formation of the masking image (relief) directly during the electron-beam exposure of the resist / M.A. Bruk, E.N. Zhikharev, V.A. Kal'nov, A.V. Spirin, D.R. Strel'tsov // Russ. Microelectron. – 2013. – Vol. 42(5). – P. 261-269.
- [2] Ciappa, M. Monte Carlo modeling in the low-energy domain of the secondary electron emission of polymethylmethacrylate for critical-dimension scanning electron microscopy / M. Ciappa // J. Micro/Nanolithography. – 2010. – Vol. 9(2). – P. 023001.
- [3] Valentin, A. Geant4 physics processes for microdosimetry simulation: Very low energy electromagnetic models for electrons in silicon / A. Valentin // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 2012. – Vol. 288. – P. 66-73.
- [4] Alexander, P. The degradation of solid polymethylmethacrylate by ionizing radiation / P. Alexander, A. Charlesby, M. Ross // Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci. – 1954. – Vol. 223(1154). – P. 392404.
- [5] Boyd, R.H. Theoretical Depolymerization Kinetics. II. The Effect of MolecularWeight Distribution in Degrading Polymers Undergoing Endgroup Initiation / R.H. Boyd // J. Chem. Phys. – 1959. – Vol. 31(321). – P. 321-328.
- [6] Karlsson, O.J. Estimating diffusion coefficients for small molecules in polymers and polymer solutions / O.J. Karlsson, J.M. Stubbs, L.E. Karlsson, D.C. Sundberg // Polymer – 2001. – Vol. 42. – P. 4915-4923.
- [7] Leveder, T. Thin polymer films viscosity measurements from nanopatterning method Thin polymer films viscosity measurements from nanopatterning method / T. Leveder // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2010. – Vol. 28. – P. 1251.
- [8] Brakke, K.A. Surface Evolver / K.A. Brakke // Encycl. Microfluid. Nanofluidics. – 2015. – P. 3115-3115.