

Моделирование процесса формирования синусоидальных голографических решеток методом термостимулированной электронно-лучевой литографии

Ф.А. Сидоров
Физико-технологический институт
имени К.А. Валиева РАН
Москва, Россия
fedor.sidorov.92@gmail.com

А.Е. Рогожин
Физико-технологический институт
имени К.А. Валиева РАН
Москва, Россия
rogozhin@ftian.ru

Аннотация — В данной работе описывается применение метода термостимулированной электронно-лучевой литографии для получения синусоидальных голографических решеток в полимерном резисте, а также приводятся результаты моделирования результирующей формы профиля решеток при различных параметрах экспонирования. На примере моделирования линий, получаемых данным методом в ПММА установлено, что при правильном подборе параметров экспонирования форма результирующего профиля с высокой точностью является синусоидальной.

Ключевые слова — термостимулированная электронно-лучевая литография, синусоидальные голографические решетки, термическая деполимеризация

1. ВВЕДЕНИЕ

Основными методами формирования синусоидальных голографических решеток в настоящее время является интерференционная литография, полутонная литография и горячее тиснение [1]. В качестве альтернативного высокопроизводительного метода формирования голографических решеток с практически идеальным синусоидальным профилем может быть применен метод термостимулированной электронно-лучевой литографии [2], 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,

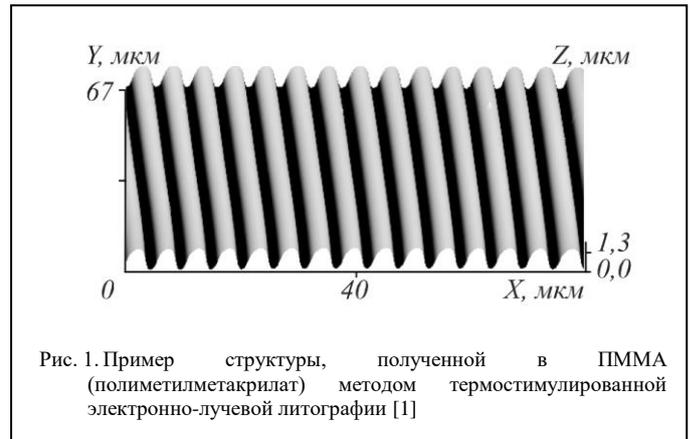


Рис. 1. Пример структуры, полученной в ПММА (полиметилметакрилат) методом термостимулированной электронно-лучевой литографии [1]

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. Характерной особенностью метода является сглаженная форма профиля, обусловленная процессами растекания, протекающими при повышенной температуре. Таким образом, экспонирование вдоль серии параллельных линий приводит к формированию решетки со сглаженным профилем, близким к синусоидальному (рис. 1).

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ, ПОЛУЧАЕМОГО МЕТОДОМ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ

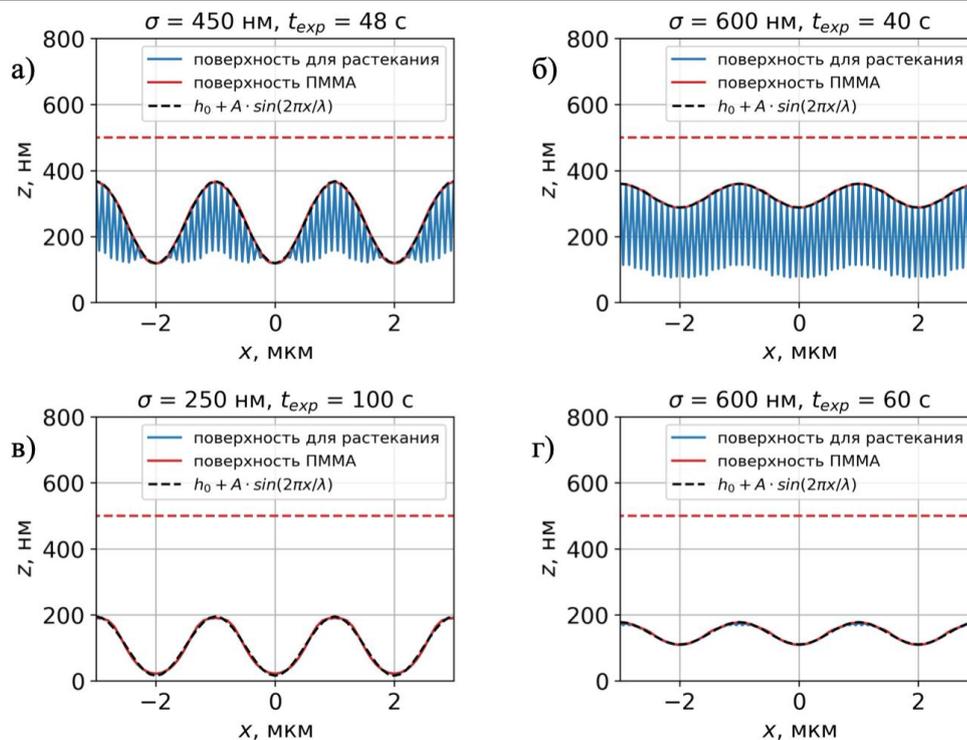


Рис. 2. Промоделированные синусоидальные профили с периодом 2 мкм, полученные в слое ПММА с начальной толщиной 500 нм. Температура образца составляла 150 °С, ток в пучке – 4,56 нА, радиус пучка варьировался от 250 нм до 600 нм, время экспонирования – от 40 до 100 с. После экспонирования образец в) охлаждался со скоростью 10 °С/с, образцы а), б), г) – со скоростью 1 °С/с до комнатной температуры. Черная пунктирная линия обозначает подгонку промоделированного профиля функцией синус

Для моделирования профиля линии, получаемой методом термостимулированной электронно-лучевой литографии, были использован алгоритм, учитывающий основные протекающие процессы – электронно-стимулированные разрывы молекул резиста, их деполимеризация, диффузия мономера и процессы растекания. Формирование результирующего профиля при этом описывается как результат затягивания микрополостей, образующихся в слое резиста при экспонировании. Для этого слой резиста со внутренними микрополостями приближается пилообразной поверхностью, для которой в дальнейшем моделируется растекание с помощью метода конечных элементов [3]. На рис. 2 приведены промоделированные профили, полученные методом термостимулированной электронно-лучевой литографии в слое ПММА с начальной толщиной 500 нм. Температура образцов составляла 150 °С, ток экспонирования – 4,56 нА. Результаты моделирования показывают, что при

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описывается применение термостимулированной электронно-лучевой литографии для получения в ПММА синусоидальных голографических решеток. Моделирование профиля линий, получаемых при экспонировании “в кадр”, показало, что правильный подбор параметров экспонирования позволяет получить форму результирующего профиля, близкую к синусоидальной. Такой результат может быть достигнут в том числе при полном затягивании микрополостей внутри слоя ПММА, что обеспечит однородность различных параметров ПММА внутри всего слоя.

правильном подборе диаметра пучка и времени экспонирования профиль линии, получаемые после охлаждения образца до комнатной температуры с высокой точностью является синусоидальным – максимальное отклонение по высоте точек промоделированного профиля от положений, задаваемых функцией синус, составляет 7 нм (для профиля на рис. 2в). При этом синусоидальный профиль может быть достигнут как при как при полном отсутствии микрополостей в резисте после экспонирования (рис. 2а,б) так и при наличии микрополостей на протяжении всего периода линии (рис. 2в,г). Для полученного в ПММА профиля в дальнейшем возможно покрытие металлом, либо перенесение в металл путем травления в реакторе индуктивно связанной плазмы [4]. В случае последнего, отсутствие микрополостей в слое резиста благоприятным образом скажется на однородности скорости травления различных участков резиста.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Reda, F. Accurate Morphology-Related Diffraction Behavior of Light-Induced Surface Relief Gratings on Azopolymers / F. Reda, M. Salvatore, F. Borbone, P. Maddalena, S. L. Oscurato // ACS Mater. Lett. – 2022. – Vol. 4(5). – P. 953–959.
- [2] 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, and D. R. Strel'tsov // Russ. Microelectron. – 2013. – Vol. 42(5). – P. 261–269.
- [3] Сидоров, Ф. А. Моделирование процесса формирования микрооптических структур методом термостимулированной электронно-лучевой литографии / Ф. А. Сидоров and А. Е. Рогожин // Сборник трудов по материалам VIII Международной конференции и молодежной школы (г. Самара, 23-27 мая). – 2022. – Т. 1.
- [4] Bruk, M. A. Formation of micro- and nanostructures with well-rounded profile by new e-beam lithography principle / Bruk M. A., Zhikharev E. N., Rogozhin A. E., Strel'tsov D. R., Kalnov V. A., Averkin S. N., Spirin A. V. // Microelectronic engineering. – 2016. – Vol. 155. – P. 92–96.