

На правах рукописи

Сидоров Федор Алексеевич

# **ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ СУХОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ТРАВЛЕНИЯ**

Специальность 2.2.2 –  
«Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники,  
квантовых устройств»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Долгопрудный – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
**Рогожин Александр Евгеньевич**

Ведущая организация: Ведущая организация

Защита состоится \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.2023 в \_\_\_\_:\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета \_\_\_\_\_ при Московском физико-техническом институте по адресу: Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИАН им. К.А. Валиева РАН и на сайте института: <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2023 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

регалии

\_\_\_\_\_ XXX

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Формирование трехмерных микро- и наноструктур является востребованным во множестве областей, таких как микроэлектроника, дифракционная оптика и нанофотоника, микро- и нанофлюидика и др. В настоящее время существует множество подходов к решению этой задачи, однако для отдельно взятого метода микроструктурирования такие преимущества, как универсальность, высокая производительность и доступность зачастую оказываются взаимоисключающими. Универсальные методы с высоким разрешением (например, полутоновая литография [1], двухфотонная литография [2] или сканирующая зондовая литография [3]) предполагают использование сложного высокоточного оборудования и обладают при этом достаточно низкой производительностью. Более производительные и доступные методы позволяют получить только периодические структуры (интерференционная литография [4]), либо структуры определенного вида (nanoимпринтная литография [5]). Таким образом, в настоящее время отсутствует метод получения произвольных микро- и наноструктур, являющийся одновременно высокопроизводительным и простым в реализации.

Ввиду этого внимания заслуживает метод сухого электронно-лучевого травления резиста (СЭЛТР) — относительно новый одностадийный литографический метод формирования рельефа в слое позитивного резиста, основанный на цепной реакции деполимеризации полимерного резиста и самопроявлении изображения непосредственно в процессе электронно-лучевого экспонирования резиста, проводимого при температурах выше его температуры стеклования [6; 7]. Характерными особенностями метода являются исключительно высокая чувствительность резиста, высокое разрешение по вертикали и возможность формирования рельефа без этапа проявления, а также скругленные стенки профиля линии. Высокая чувствительность резиста обеспечивает производительность метода в десятки и даже сотни раз превышающую производительность обычной электронно-лучевой литографии. Благодаря этим особенностям метод может быть использован для формирования дифракционных оптических элементов, различных трехмерных микро- и наноструктур или масок. Также возможной областью его применения является формирование каналов для использования в микро- и нанофлюидике, поскольку отсутствие острых углов в сечении канала положительно скажется на его гидравлическом диаметре.

Однако, латеральное разрешение метода ограничено, и в настоящее время при использовании электронно-лучевых систем с диаметром электронного луча около

10-15 нм удается получать линии шириной 300-400 нм. Область применения метода могла бы быть существенно расширена, если бы удалось повысить его латеральное разрешение. В силу одновременного протекания в процессе СЭЛТР множества различных процессов точный механизм формирования конечного профиля линии не был понятен, что не позволяло выявить пути оптимизации данного метода. Таким образом, целесообразным является разработка физической модели метода СЭЛТР, что позволит определить возможности метода и оптимизировать его для применения в различных областях.

### **Степень разработанности темы исследования**

Первые шаги в изучении метода микролитографии на основе термической деполимеризации резиста описываются в работе [8]. В ней приводятся результаты инициированной  $\gamma$ -излучением деполимеризации ПММА в виде нанометрового слоя, адсорбированного на поверхности пор силохрома. Несмотря на то, что в данной работе термическая деполимеризация не использовалась для формирования изображения в резисте, а исследовалась в общем, результаты работы позволили определить особенности потенциально возможного метода микроструктурирования на основе этого явления. Так, например, были получены оценки для времени диффузии мономера в слое ПММА после разрушения молекулы и длины кинетической цепи деполимеризации, сделаны выводы о масштабах протекания процессов передачи активного центра деполимеризации на мономер и полимер. Также было установлено, что при термической деполимеризации ПММА при температурах 120–180 °С влияние процессов реполимеризации пренебрежимо мало. Впоследствии были проведены эксперименты по изучению термической деполимеризации полиметилметакрилата (ПММА), протекающей при экспонировании электронным лучом, а также впервые были продемонстрированы двумерные и трехмерные структуры, полученные в ПММА в этом процессе [6].

Наиболее актуальные на сегодняшний день экспериментальные результаты по исследованию метода сухого электронно-лучевого травления резиста приведены в работах [7; 9]. В них исследовались периодические профили, полученные при экспонировании резиста электронным лучом вдоль серии параллельных линий. Было продемонстрировано, что при таком экспонировании результирующий профиль приобретает практически синусоидальную форму, что является аргументом в пользу применения метода СЭЛТР для формирования дифракционных оптических элементов [10]. Также была продемонстрирована возможность переноса профиля, полученного в ПММА, в вольфрам или кремний за счет сухого травления в реакторе ин-

дуктивно-связанной плазмы. Этот факт теоретически позволяет использовать метод СЭЛТР для формирования, например, штампов для термической наноимпринтной литографии.

### **Цели и задачи**

Целью данной работы является создание модели процесса электронно-лучевого травления резиста и разработка на ее основе метода, позволяющего оценить параметры процесса для формирования необходимого профиля. Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Выделить основные процессы, влияющие на профиль линии в методе СЭЛТР;
2. Разработать модели этих процессов и их совместного протекания;
3. Провести экспериментальную верификацию разработанной модели;
4. Используя созданную модель разработать метод определения параметров СЭЛТР (ток, энергия и профиль электронного пучка, температура подложки, скорость охлаждения подложки) для формирования необходимого профиля.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Создана модель сухого электронно-лучевого травления резиста, позволяющая определить профиль линии получаемый при заданных условиях процесса;
2. Разработан метод определения параметров СЭЛТР (ток, энергия и профиль электронного пучка, температура подложки, скорость охлаждения подложки) для формирования необходимого профиля, состоящий в оптимизации параметров путем многократного моделирования профиля;
3. С помощью разработанного метода продемонстрирована возможность формирования методом СЭЛТР синусоидальных дифракционных и голограмических элементов, продемонстрированы возможности метода СЭЛТР (разрешение, контраст, чувствительность метода к флуктуации параметров СЭЛТР, возможность формирования произвольных трехмерных структур с профилем, задающимся дифференцируемой функцией);

### **Научная новизна**

1. Установлены основные процессы, определяющие форму линии в методе СЭЛТР: рассеяние электронного пучка в резисте и подложке, электронно-стимулированные разрывы полимерных молекул, термическая деполимери-

зация резиста, диффузия мономера и растекание резиста, **а также разработаны модели перечисленных процессов;**

2. Впервые проведено исследование процесса формирования профиля с помощью электронно-стимулированной термической деполимеризации резиста **и показано, как параметры процесса влияют на профиль;**
3. Предложена модель температурной зависимости радиационно-химического выхода разрывов ( $G_s$ ) – увеличение  $G_s$  с ростом температуры от 0 до 200 °C может быть описано за счет увеличения вероятности разрыва молекулы при электрон-электронном рассеянии от 0.045 до 0.105;
4. Разработан оригинальный подход к моделированию растекания резиста с неоднородным профилем вязкости, **состоящий в определении подвижности вершин поверхности резиста  $\mu$  на основе его вязкости  $\eta$  (в Па с) по формуле:**  $\mu \approx 26.14/\eta$ ;

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы состоит в том, что впервые была создана модель формирования рельефа в резисте за счет совместного воздействия основных процессов, характерных для метода СЭЛТР – электронно-стимулированных разрывов молекул резиста при повышенной температуре, термической деполимеризации резиста, диффузии мономеров слое резиста и растекания профиля линии за счет пониженной вязкости. Практическая значимость работы заключается в том, что был разработан подход определения тока и энергии электронного пучка, температуры подложки и скорости охлаждения подложки в методе СЭЛТР для формирования произвольных трехмерных структур **с профилем, задающимся дифференцируемой функцией.**

### **Методология и методы исследования**

Основным методом исследования основных процессов СЭЛТР являлось математическое моделирование. Для моделирования рассеяния электронного пучка использовался Монте-Карло алгоритм с дискретными потерями энергии. Моделирование слоя ПММА производилось на основе модели идеальной цепи. Моделирование диффузии мономера в слое ПММА проводилось путем численного решения уравнения диффузии. Для моделирования растекания профиля линии применялся аналитический подход, основанный на решении уравнения Навье-Стокса для периодического профиля в резисте с однородной вязкостью и численный подход на основе метода конечных элементов.

## Степень достоверности и апробация результатов

Поскольку на конечный профиль линии, получаемой методом СЭЛТР, влияет сразу несколько процессов, точность их описания проверялась на каждом этапе. Так, при моделировании рассеяния электронного пучка в системе ПММА/Si сечения упругих и неупругих процессов вычислялись с использованием наиболее современных моделей взаимодействия излучения с веществом (моттовские дифференциальные сечения упругого рассеяния и сечения неупругого рассеяния, рассчитанные с помощью функции потерь энергии). Вероятность электронно-стимулированного разрыва молекулы ПММА определялась на основе моделирования радиационно-химического выхода разрывов, вычисляемого экспериментально из распределения молекулярной массы ПММА. Полученные значения для длины кинетической цепи при деполимеризации ПММА при различных температурах согласуются с опубликованными значениями, рассчитанными на основе констант деполимеризации и обрыва кинетической цепи деполимеризации в кинетических моделях термической деструкции ПММА. Диффузия мономеров в слое ПММА моделировалась с коэффициентами диффузии, соответствующим различным значениям температурам и локальной массы ПММА. Полученная в результате оценка сверху для времени диффузии привела к значению, пренебрежимо малому по сравнению с характерным временем протекания других процессов. Подход, использующийся для моделирования растекания профиля линии в процессе СЭЛТР, эффективно применяется в смежной области – моделировании растекания структур, полученных методом наноимпринтной литографии, и его точность отмечена в ряде работ.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- 60-я всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный (2016);
- International conference on information technology and nanotechnology (ITNT), Самара (2017, 2018, 2020, 2022);
- III International Conference on modern problems in physics of surfaces and nanostructures (ICMPSN17), Ярославль (2017);
- Micro- and Nanoengineering (MNE), Копенгаген (2018), Родос (2019);
- International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN"on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, Санкт-Петербург (2019, 2020).

Диссертация состоит из четырех глав, основные результаты которых изложены в статьях [A1–A9]. Все статьи опубликованы в рецензируемых международных журналах, включённых в библиографические базы (РИНЦ, Scopus, Web of Science).

## Личный вклад автора

Общая постановка задачи осуществлялась научным руководителем автора Рогожиным А. Е. Для верификации результатов моделирования были использованы структуры, полученные методом СЭЛТР М. А. Бруком, А. Е. Рогожиным и Е. Н. Жихаревым. Все результаты, изложенные настоящей диссертации, получены автором лично.

## Содержание работы

В диссертации проводится теоретическое изучение относительно нового метода формирования трехмерных микро- и наноструктур – сухого электронно-лучевого травления резиста (СЭЛТР).

В начале первой главы приводится описание основных методов микро- и наноструктурирования, существующих в настоящее время – наноимпринтной литографии [5], двухфотонной лазерной литографии [2], интерференционной литографии [4], полутоновой литографии [1] и сканирующей зондовой литографии [3]. Исходя из их преимуществ и недостатков делается заключение о том, что в настоящее время отсутствует метод, обеспечивающий высокую производительность и являющийся в то же время простым в реализации.

Далее рассматривается концепция микролитографии на основе локальной термической деполимеризации резиста и описываются первые шаги в разработке метода сухого электронно-лучевого травления резиста. Описанные в работах [6; 7] эксперименты демонстрируют высокую производительность метода, а также сглаженный профиль получаемых структур (рис. 1). При этом отмечается низкое латеральное разрешение метода, которое заметно ограничивает его область применимости. Поскольку при сухом электронно-лучевом травлении резиста профиль линии формируется под влиянием нескольких одновременно протекающих процессов, определение влияния каждого из них на результирующий профиль, разработка методов оптимизации метода СЭЛТР и оценка его возможностей на основе лишь экспериментальных исследований было затруднительным. И хотя основные процессы, протекающие при СЭЛТР (рассеяние электронного пучка в резисте и подложке, электронно-стимулированные разрывы молекул резиста, цепная деполимеризация резиста, диффузия мономера и растекание резиста) являются относительно хорошо изученными, их совместное протекание в процессе микроструктурирования до настоящего момента не исследовалось. Таким образом, целесообразным являлась разработка физической модели данного метода, верифицированной на основе имеющихся экспериментальных данных и позво-

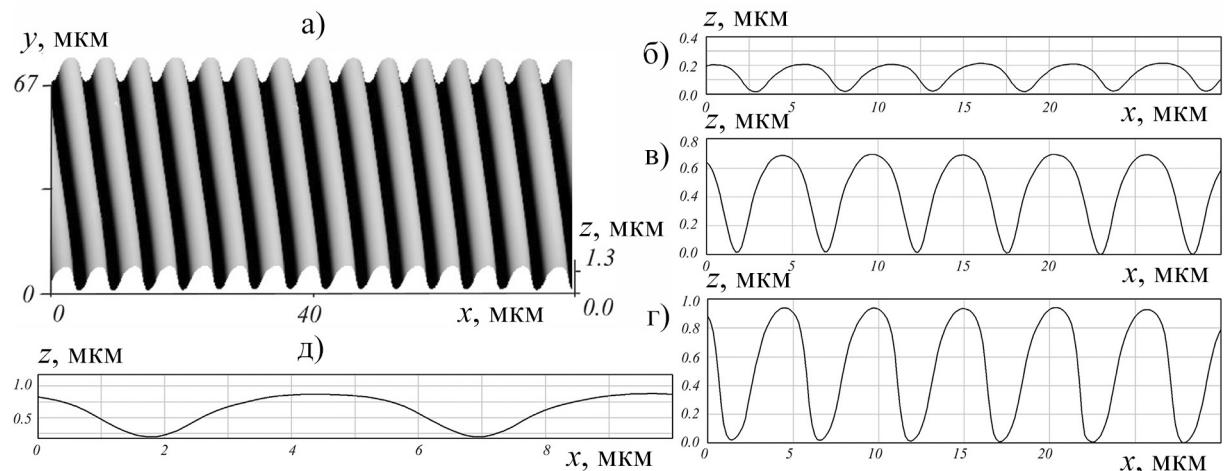


Рис. 1 – Периодические профили, полученные методом СЭЛТР в слое ПММА толщиной 900 нм при экспонировании резиста “в кадр”. Размеры кадра составляют  $3 \times 3.9$  мм<sup>2</sup>, число линий в кадре – 625, температура образца – 160 °С. а) – Трехмерное изображение; б), в), г) – профили, полученные при дозах экспонирования 0.05, 0.2 и 0.87 мкКл/см<sup>2</sup>, соответственно, д) – изображение профиля в) в масштабе 1:1 [7].

ляющей определить предельное разрешение метода, а также оценить возможность его применения для формирования необходимых структур.

**Вторая глава** посвящена описанию существующих моделей и методов моделирования основных процессов, протекающих при СЭЛТР. Некоторые процессы являются достаточно хорошо изученными – например, в настоящее время существуют различные подходы к описанию упругого и неупругого рассеяния, и наиболее современные из них обеспечивают высокую точность моделирования [11–13]. В то же время, некоторые процессы являются изученными относительно слабо – например, для описания процесса электронно-стимулированных разрывов полимерных молекул существует общий подход, основанный на анализе распределения выделившейся в резисте энергии [14], и разработанная на его основе микроскопическая модель разрывов [15] может применяться только для температур вблизи комнатной. В отдельную группу можно отнести процессы диффузии мономера в слое резиста и растекания резиста – для их описания существуют относительно простые и в то же время достаточно точные методы [16–20], однако их использование в исходном виде представляется невозможным в силу неоднородного профиля молекулярной массы резиста в методе СЭЛТР. Наконец, кинетические модели цепной деполимеризации резиста, описывающие изменение молекулярной массы резиста, требуют задания различных констант (как минимум, константы инициирования деполимеризации и средней длины цепи деполимеризации), значения которых приведены в литературе лишь для случаев простой термической деполимеризации (не являющейся электронно-стимулирован-

ной) [21; 22]. Все вышесказанное указывает на необходимость доработки большинства существующих подходов для их применения при моделировании метода СЭЛТР.

В третьей главе приводятся методы, которые были использованы при разработке и верификации модели процесса СЭЛТР. В качестве резиста в разработанной модели использовался полиметилметакрилат (ПММА), в качестве материала подложки – кремний. Для моделирования рассеяния электронного луча в резисте и подложке был использован алгоритм Монте-Карло с моттовскими сечениями упругого рассеяния [11]:

$$\frac{d\sigma_{el}}{d\Omega} = |f(\theta)|^2 + |g(\theta)|^2, \quad (1)$$

где  $f(\theta)$  и  $g(\theta)$  – амплитуды рассеяния, соответствующими параллельному и антипараллельному направлению спина электрона относительно его направления движения, и сечениями неупругого электрон-электронного рассеяния, рассчитанными из диэлектрической функции:

$$\frac{d\sigma_{e-e}^{-1}}{d\hbar\omega} = \frac{1}{\pi E a_0 n} \int_{k_-}^{k_+} \text{Im} \left[ \frac{-1}{\varepsilon(q, \omega)} \right] \frac{dq}{q}, \quad (2)$$

где

$$q_\pm = \frac{\sqrt{2m}}{\hbar} (\sqrt{E} \pm \sqrt{E - \hbar\omega}), \quad (3)$$

$E$  – энергия налетающего электрона,  $m$  – масса электрона,  $a_0$  – боровский радиус,  $n$  – концентрация рассеивающих центров в веществе. Для ПММА функция потерь энергии  $\text{Im} \left[ \frac{-1}{\varepsilon(q, \omega)} \right]$  определялась на основе диэлектрической функции Мермина [23], для кремния – как сумма функций потерь энергии отдельных осцилляторов [13]. Для повышения точности при моделировании рассеяния низкоэнергетических электронов в ПММА также учитывалось электрон-фононное и электрон-поляронное взаимодействие [12].

Для описания электронно-стимулированных разрывов молекул ПММА при повышенной температуре была разработана оригинальная микроскопическая модель. В качестве приводящих к разрыву полимерных молекул рассматривались акты электрон-электронного рассеяния, и для моделирования электронно-стимулированных разрывов молекул была введена вероятность разрыва при электрон-электронном рассеянии  $p_s$ . При заданной вероятности разрыва  $p_s$  акты электрон-электронного взаимодействия, приводящие к разрыву молекул, моделировались методом Монте-Карло:

$$\begin{aligned} \xi < p_s &\Rightarrow \text{разрыв молекулы} \\ \xi \geq p_s &\Rightarrow \text{нет разрыва} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\xi$  – случайное число из промежутка  $[0, 1]$ . Значение  $p_s$  для различных температур было определено путем моделирования эксперимента по определению радиационно-химического выхода разрывов  $G_s$ .  $G_s$  определяется как число разрывов, происходящих при выделении в нем энергии 100 эВ, и может быть определено экспериментально на основе среднечисловых значений молекулярной массы полимера до и после экспонирования ( $M_n$  и  $M_f$ , соответственно):

$$\begin{aligned} G_s &= n_{\text{разрывов}} / 100 \text{ эВ} – \text{теоретически} \\ G_s : M_f &= \frac{M_n}{1 + \frac{G_s \epsilon}{100 \rho N_A}} – \text{экспериментально,} \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\epsilon$  – энергия, выделившаяся в единице объема резиста,  $\rho$  – плотность резиста,  $N_A$  – постоянна Авогадро.

Моделирование слоя резиста размерами  $100 \times 100 \times 500$  нм<sup>3</sup> производилось на основе модели идеальной цепи [24], и дальнейшее сопоставление промоделированных актов электрон-электронного рассеяния конкретным мономерам позволило промоделировать распределение молекулярной массы проэкспонированного резиста при различных значениях  $p_s$ . Так для каждой температуры было подобрано значение  $p_s$ , обеспечивающее соответствие между промоделированным и экспериментальным [25] значением радиационно-химического выхода разрывов. На рис. 2 приведены температурные зависимости  $p_s$ , вычисленные при моделировании  $G_s$  и непосредственно на основе числа разрывов и выделившейся в резисте энергии. Различие между ними указывает на целесообразность моделирования распределения молекулярной массы для определения  $p_s$ .

Для моделирования электронно-стимулированной цепной деполимеризации ПММА в условиях метода СЭЛТР была использована кинетическая модель термической деполимеризации при инициировании активных центров деполимеризации в произвольных точках молекулы [21]. С учетом процессов инициирования деполимеризации, распространения активного центра деполимеризации вдоль молекулы и его исчезновения эта модель может быть сформулирована в виде системы дифференциальных уравнения на моменты функции распределения молекулярной массы резиста:

$$\frac{dM_i}{dt} = k_s \left( \frac{2}{i+1} - 1 \right) M_{i+1} + \frac{dM_0}{dt} - k_s M_1 - \frac{i}{\gamma} \left( k_s M_i + \frac{dM_{i-1}}{dt} \right) \quad (i \geq 1), \quad (6)$$

$k_s$  – константа инициирования деполимеризации (число активных центров деполимеризации, появившихся за 1 с, приходящееся на один мономер),  $1/\gamma$  – средняя длина

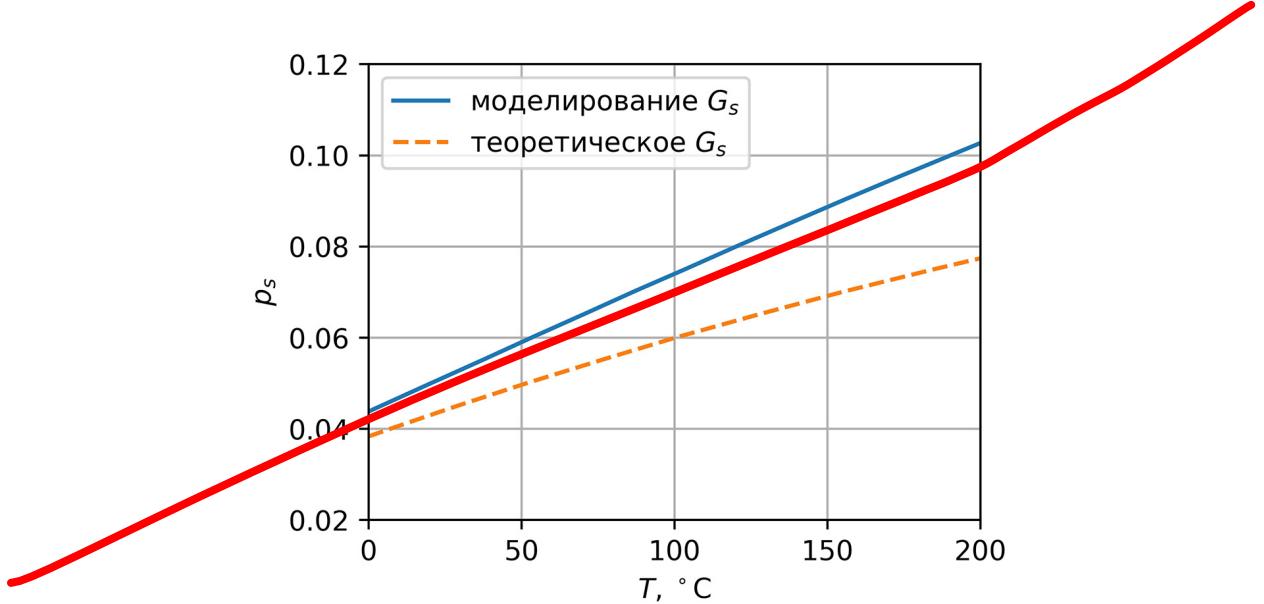


Рис. 2 – Зависимость вероятности разрыва  $p_s$  молекулы ПММА при электрон-электронном взаимодействии от температуры  $T$  резиста в диапазоне температур 0–200°C.

цепи деполимеризации,  $M_i$  – момент функции распределения порядка  $i$  ( $P_n$  – число полимерных молекул степени полимеризации  $n$ ):

$$M_i = \sum_{n=2}^{\infty} n^i P_n. \quad (7)$$

Данная система решалась численно в предположении, что распределение молекулярной массы резиста описывается функцией распределения Шульца-Цимма [26] для каждой ячейки резиста размерами  $100 \times 100 \times 5 \text{ нм}^3$ . При определении  $k_s$  в каждой ячейке считалось, что число активных центров деполимеризации, появившихся за 1 с в ячейке, равно числу разрывов полимерных молекул, промоделированных с помощью вышеописанного подхода, число мономеров в ячейке определялось на основе плотности и молярной массы ПММА. Такой подход позволил промоделировать локальное изменение распределения молекулярной массы ПММА в ходе экспонирования в процессе СЭЛТР. (рис. 3)

Моделирование локального распределения молекулярной массы ПММА сделало возможным определение локального значений коэффициента диффузии мономера, образующегося в слое ПММА в результате деполимеризации,  $D$ , а также вязкости резиста  $\eta$  на основе экспериментальных значений и зависимостей, приведенных в работах [17; 19; 27–29]. Моделирование диффузии путем численного решения уравнения диффузии показало, что в условиях метода СЭЛТР коэффициент диффузии за первые секунды экспонирования снижается до значений, при которых время диффу-

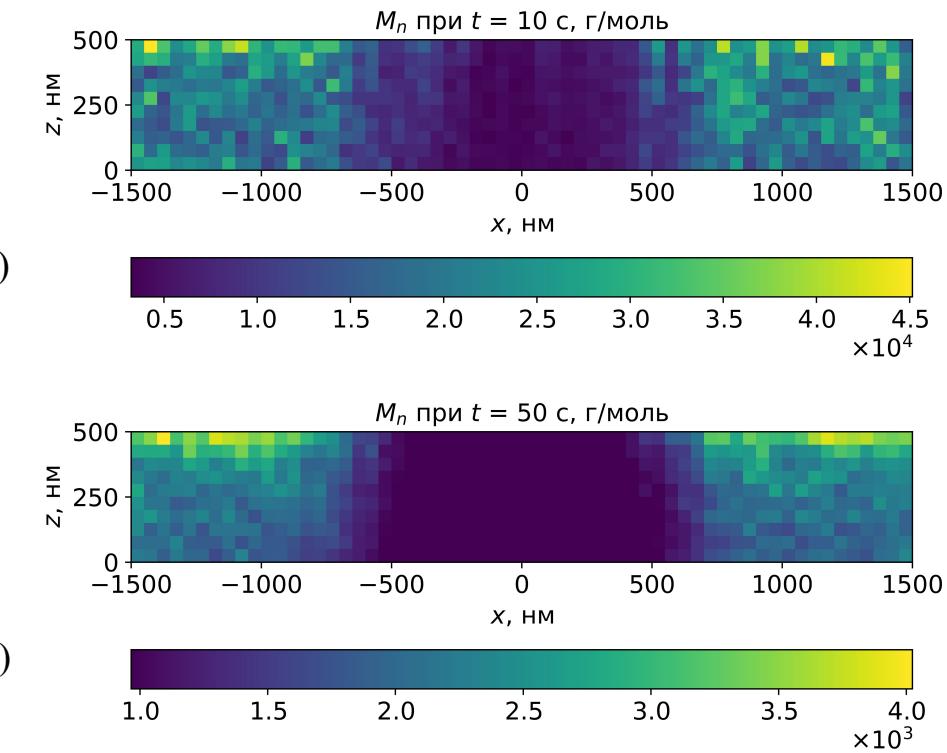


Рис. 3 — Моделирование распределения среднечисловой молекулярной массы ПММА марки 950К при его экспонировании электронным лучом «в кадр», с расстоянием между линиями 3 мкм. На рис. показано распределение локальной молекулярной массы резиста в пределах одной линии. Плотность тока на единицу длины линии составляет около 3 нА/см, начальная энергия электронов в пучке – 20 кэВ, толщина слоя ПММА – 500 нм, температура образца – 150 °С. Время экспонирования составляет 10 с (а) и 50 с (б).

зии мономера из слоя толщиной в несколько сотен нанометров составляет менее 1 с. Таким образом, в дальнейшем считалось, что мономер, образовавшийся в процессе деполимеризации мгновенно покидает объем травления, что приводит к образованию микрополостей в слое ПММА.

Для моделирования растекания ПММА с неоднородным профилем вязкости использовался численный подход на основе метода конечных элементов [30]. В нем процесс растекания какого-либо тела рассматривается как процесс эволюции его поверхности, направленный на уменьшение поверхностной энергии, и при этом различие коэффициентов вязкости различных участков тела может быть учтено за счет задания различных значений подвижности вершин поверхности. Для определения соотношения, связывающего вязкость тела и подвижность вершин его поверхности было проведено моделирование растекания прямоугольных решеток с постоянным значением вязкости аналитическим [19] и численным методом. Для значений коэффициента вязкости в диапазоне  $10^2$ – $10^6$  Па с были подобраны значения подвижности вершин поверхности решетки, обеспечивающие соответствие результатами, полученными обоими методами (рис. 4). В результате было установлено, что подвижность

вершин поверхности  $\mu$  может быть рассчитана из вязкости резиста  $\eta$  по формуле

$$\mu \approx \frac{26.14}{\eta}. \quad (8)$$

Полученная зависимость позволяет рассчитывать локальную подвижность вершин резиста с неоднородным профилем вязкость, определенным с помощью вышеописанного подхода.

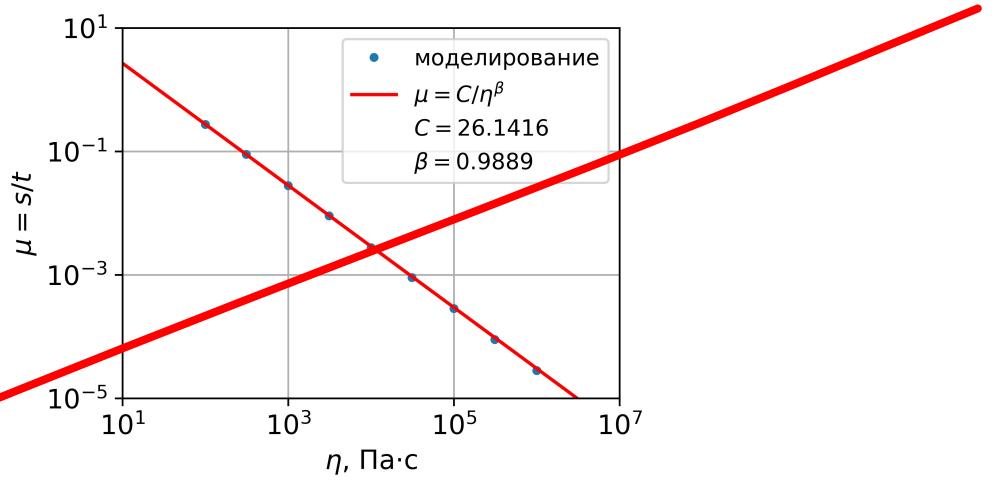


Рис. 4 – Полученная зависимость подвижности вершин поверхности ПММА от его вязкости.

Для моделирования растекания резиста моделируется пилообразная структура, в которой объем “зубьев” равен суммарному объему микрополостей в резисте (рис. 5).

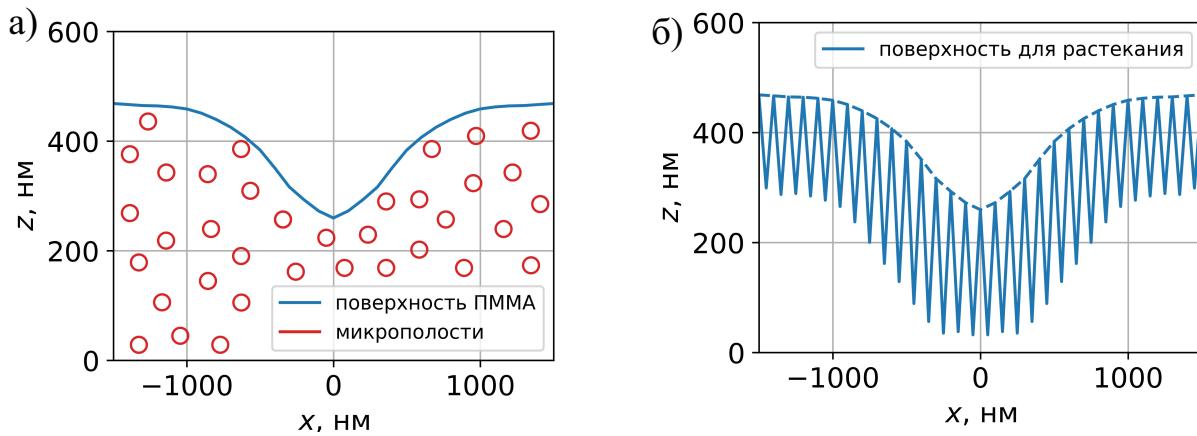


Рис. 5 – Иллюстрация подхода к моделированию растекания слоя ПММА со внутренними микрополостями.

Вышеописанные модели отдельных процессов, протекающих при СЭЛТР были использованы для разработки алгоритма моделирования конечного профиля линии, получаемой этим методом. Для этого все время экспонирования разбивалось на про-

межутки величиной 1 с, и в течение каждого промежутка последовательно производились следующие действия:

1. Моделирование рассеяния электронного пучка в ПММА и подложке;
2. Моделирование разрывов молекул ПММА;
3. Вычисление локальной молекулярной массы и вязкости ПММА;
4. Вычисление объемов образовавшихся в ПММА микрополостей на основе концентрации разрывов и значения средней длины цепи деполимеризации;
5. Преобразование слоя ПММА со внутренними микрополостями в пилообразную структуру;
6. Моделирование растекания пилообразной структуры;
7. Определение нового положение вершин поверхности слоя ПММА.

По истечении времени экспонирования также моделировалось растекание слоя ПММА при его охлаждения до температуры, при которой процессы растекания перестают протекать заметным образом (было установлено, что эта температура составляет около 80 °C).

Для верификации разработанной модели методом СЭЛТР были получены периодические структуры в слое ПММА (марки 950К) с начальной толщиной 500 нм на кремниевой подложке. Для экспонирования резиста использовался электронный микроскоп CAMSCAN S-4, который был модифицирован для возможности нагрева образца. Давление в камере микроскопа находилось на уровне  $10^{-5}$  мбар, энергия электронов в пучке составляла 20 кэВ, диаметр пучка – около 600 нм.

Экспонирование резиста проводилось “в кадр” с размером кадра  $2.4 \times 1.9$  см<sup>2</sup>, число линий в кадре равнялось 625. Ток экспонирования  $I_{exp}$  находился в диапазоне 4.56–5.62 нА, время экспонирования  $t_{exp}$  варьировалось от 100 до 200 с, таким образом, доза экспонирования на единицу длины линии  $D_l$  находилась в диапазоне 3.00–3.69 нКл/см. Температура образцов при экспонировании  $T$  варьировалась от 130 до 150 °C, скорость охлаждения образца после экспонирования составляла около 0.2 °C/с, скорость охлаждения подложки после экспонирования – около 0.2 °C/с. При снижении температуры образца до 50 °C он извлекался из камеры микроскопа. Профили линий были получены методом атомно-силовой микроскопии с помощью микроскопа Nanopics 2100.

Для снижения требуемого машинного времени моделирование проводилось для участка одной линии длиной 100 нм, и влияние соседних линий учитывалось за счет использования зеркальных граничных условий. Число разрывов, локальная молекулярная и объем микрополостей вычислялись для областей размерами 100 нм × 100 нм × 5 нм (по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , соответственно).

Для учета стохастической природы алгоритма моделирования здесь и далее конечный промоделированный профиль получался за счет усреднения 100 отдельно промоделированных профилей. Сравнение экспериментальных и промоделированных профилей приведено на рис. 6. Высокая степень воспроизведения экспериментальных профилей указывает на достоверность разработанной модели метода СЭЛТР.

Было установлено, что при описанных выше параметрах экспонирования средняя длина цепи деполимеризации остается постоянной на протяжении первых 100 с процесса, и ее значения составляют 100 и 150 для температур 130 °C и 150 °C, соответственно. При дальнейшем экспонировании средняя длина цепи деполимеризации снижается, и на временном промежутке 100–200 с ее значения составляют 70 и 30 для температур 130 °C и 150 °C, соответственно. Следует отметить, что по порядку величины эти значения согласуются со значениями, рассчитанными на основе констант процессов, протекающих при деполимеризации резиста [22].

Было установлено, что при полном затягивании микрополостей внутри слоя ПММА на момент остывания образца среднеквадратичное отклонение высоты точек профиля составляет примерно от 0.5 до 3 нм со средним значением около 2 нм. Однако, при наличии микрополостей внутри слоя ПММА на момент остывания (образец, полученный при экспонировании в течение 100 С при температуре 130 °C) среднеквадратичное отклонение точек в центре линии превышает 10 нм.

Разработанная модель процесса СЭЛТР позволяет определить влияние параметров экспонирования на результирующий профиль линии. В том числе, с помощью данной модели можно определить влияние флуктуаций параметров экспонирования на форму профиля. Было установлено, что в качестве требований к стабильности параметров экспонирования в методе СЭЛТР могут быть приняты максимальные значения флуктуации энергии пучка, тока экспонирования и температуры образца, составляющие примерно 0.5 кэВ, 0.1 нА и 1°C, соответственно, что обеспечивает изменение высоты вершин профиля в пределах среднеквадратичного отклонения, полученного при моделировании (около 2 нм). Также важной особенностью метода СЭЛТР является тот факт, что формирование профиля завершается только при охлаждении образца до температур ниже 80°C, что занимает некоторое время после окончания экспонирования. Было установлено, что требование к стабильности скорости охлаждения образца может быть сведено к максимальной флуктуации скорости охлаждения образца, равной 0.1 °C/c.

На основе разработанной модели можно выделить два пути увеличения разрешения данного метода. Во-первых, латеральное разрешение метода может быть улучшено при использовании узкого высокоэнергетического пучка. Малый диаметр пучка

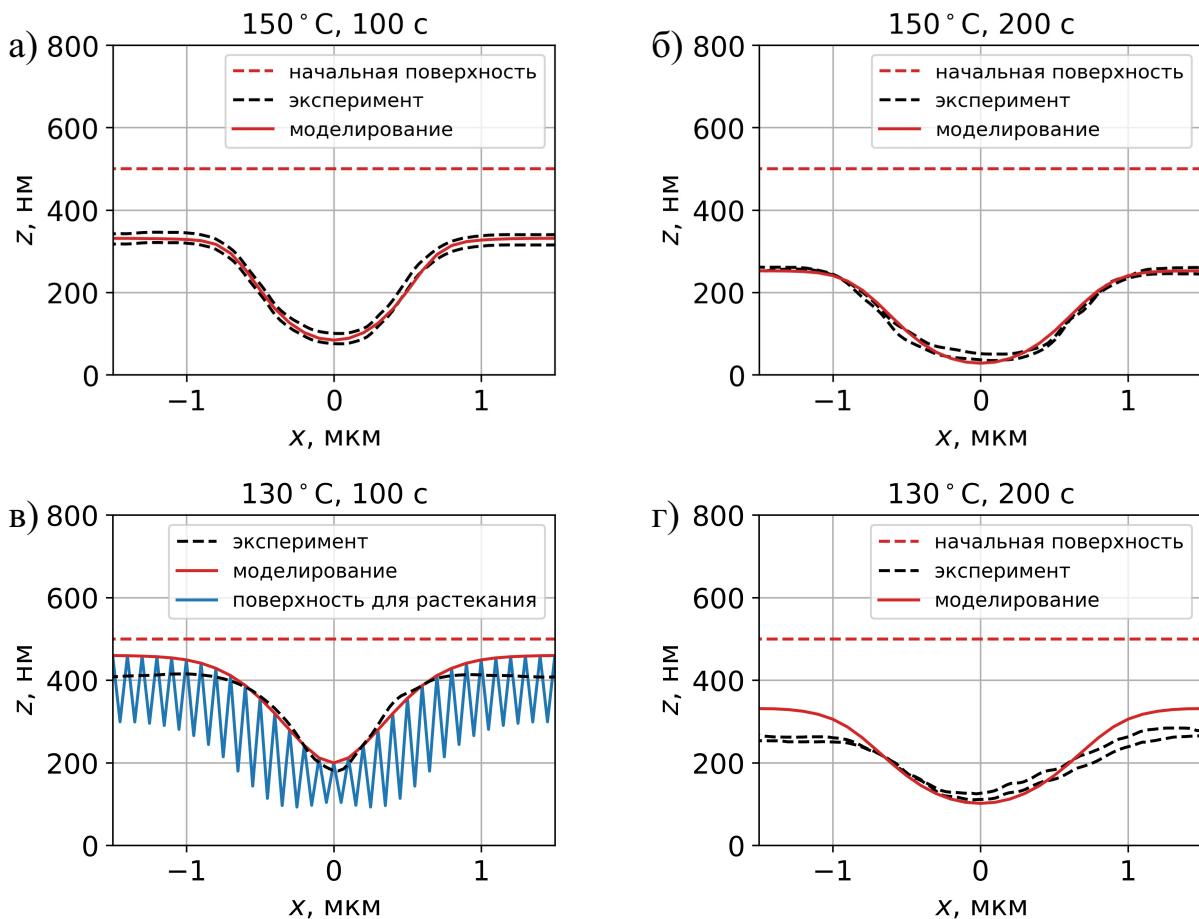


Рис. 6 – Верификация разработанной модели процесс СЭЛТР – сравнение экспериментальных и промоделированных профилей, полученных при различных параметрах экспонирования: а)  $T = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{exp} = 100 \text{ с}$ ,  $D_l = 3.00 \text{ нКл/см}$ ; б)  $T = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{exp} = 200 \text{ с}$ ,  $D_l = 3.37 \text{ нКл/см}$ ; в)  $T = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{exp} = 100 \text{ с}$ ,  $D_l = 3.12 \text{ нКл/см}$ ; в)  $T = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{exp} = 200 \text{ с}$ ,  $D_l = 3.69 \text{ нКл/см}$ . Во всех случаях, энергия пучка составляет 20 кэВ, диаметр пучка – около 600 нм, охлаждение описывается экспериментальной кривой охлаждения. Чёрная пунктирная линия обозначает профиль (или профили), полученные в эксперименте, красная пунктирная линия – начальное положение поверхности ПММА, синяя линия – пилообразную поверхность, использовавшуюся для моделирования растекания слоя ПММА со внутренними микрополостями.

позволит локализовать большую часть разрывов молекул ПММА в центре линии, что вызовет интенсивную деполимеризацию, образование мономера и снижение вязкости резиста в этой области. При этом за счет высокой энергии пучка будет снижено число разрывов на краях линии, вызванных обратно отраженными электронами. При этом будет необходимо подобрать время экспонирования так, чтобы микрополости в центре линии затянулись, а микрополости на краях линии остались незатянутыми.

Во-вторых, использование узкого низкоэнергетического пучка также может улучшить латеральное разрешение. При низкой энергии первичных электронов область, в которой будут находиться разрывы молекул, будет находиться вблизи центра

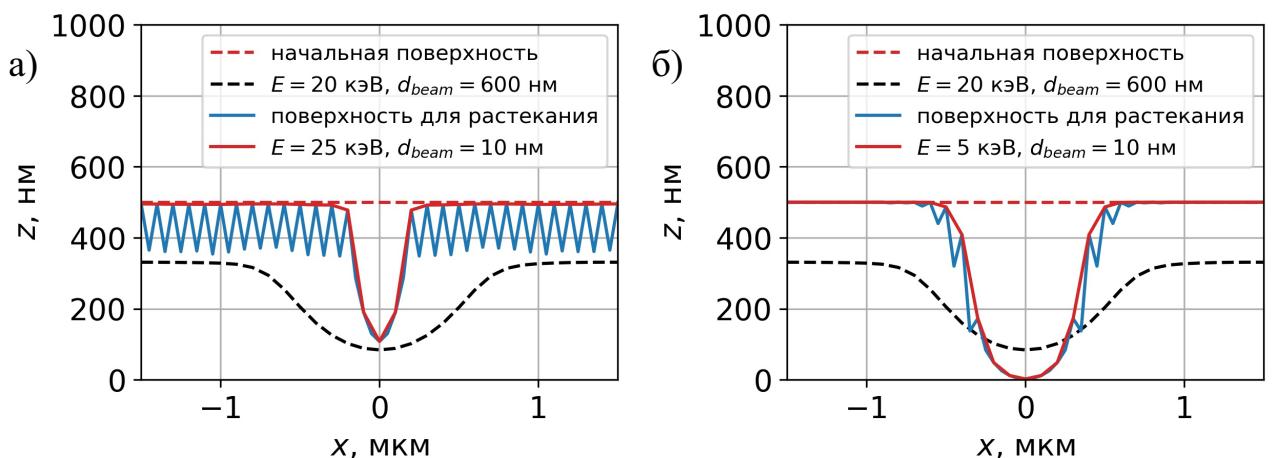


Рис. 7 – Линии, полученные методом СЭЛТР с максимальным разрешением с использованием узкого высокоэнергетического (25 кэВ, а)) или низкоэнергетического (5 кэВ, б)) пучка. Диаметр пучка составляет равным 10 нм, температура образцов – 150 °C/с, начальная толщина слоя ПММА – 500 нм. Ток экспонирования равен 4.56 нА, скорость охлаждения образцов – 10 °C/с.

линии за счет относительно небольшой глубины проникновения электронов. Таким образом, микрополости внутри слоя ПММА будут формироваться только в ограниченной области вблизи центра линии, что исключит “проседание” краев линии.

Промоделированные профили с латеральным разрешением, улучшенным обоими способами, приведены на рис. 7. Диаметр пучка был принят равным 10 нм, температура образца – 150 °C/с, начальная толщина слоя ПММА – 500 нм. Ток экспонирования был равен 4.56 нА, энергия составляла 25 кэВ (высокоэнергетический пучок) или 5 кэВ (низкоэнергетический пучок), скорость охлаждения образцов – 10 °C/с.

Исходя из результатов моделирования, можно заключить, что использование узкого высокоэнергетического пучка способно повысить латеральное разрешение до величины около 300 нм. При этом также было установлено, что минимальная толщина слоя резиста в центре линии ограничена значением около 100 нм за, причиной чего является относительно большая средняя длина свободного пробега электронов при высоких энергиях, а также быстрое заполнение линии близлежащим резистом за счет процессов растекания. Использование узкого низкоэнергетического пучка, в свою очередь, обеспечивает латеральное разрешение около 600 нм, однако, делает возможным полное травление резиста в центре линии за счет относительно небольшой средней длины свободного пробега электронов при низких энергиях. При этом в обоих вышеописанных случаях угол наклона профиля на полувысоте составляет 65–72°, что практически в три раза превышает угол наклона на полувысоте в экспериментальных структурах (24–27°).

На основании результатов моделирования можно заключить, что при выборе оптимальных параметров экспонирования метод СЭЛТР позволяет получает практи-

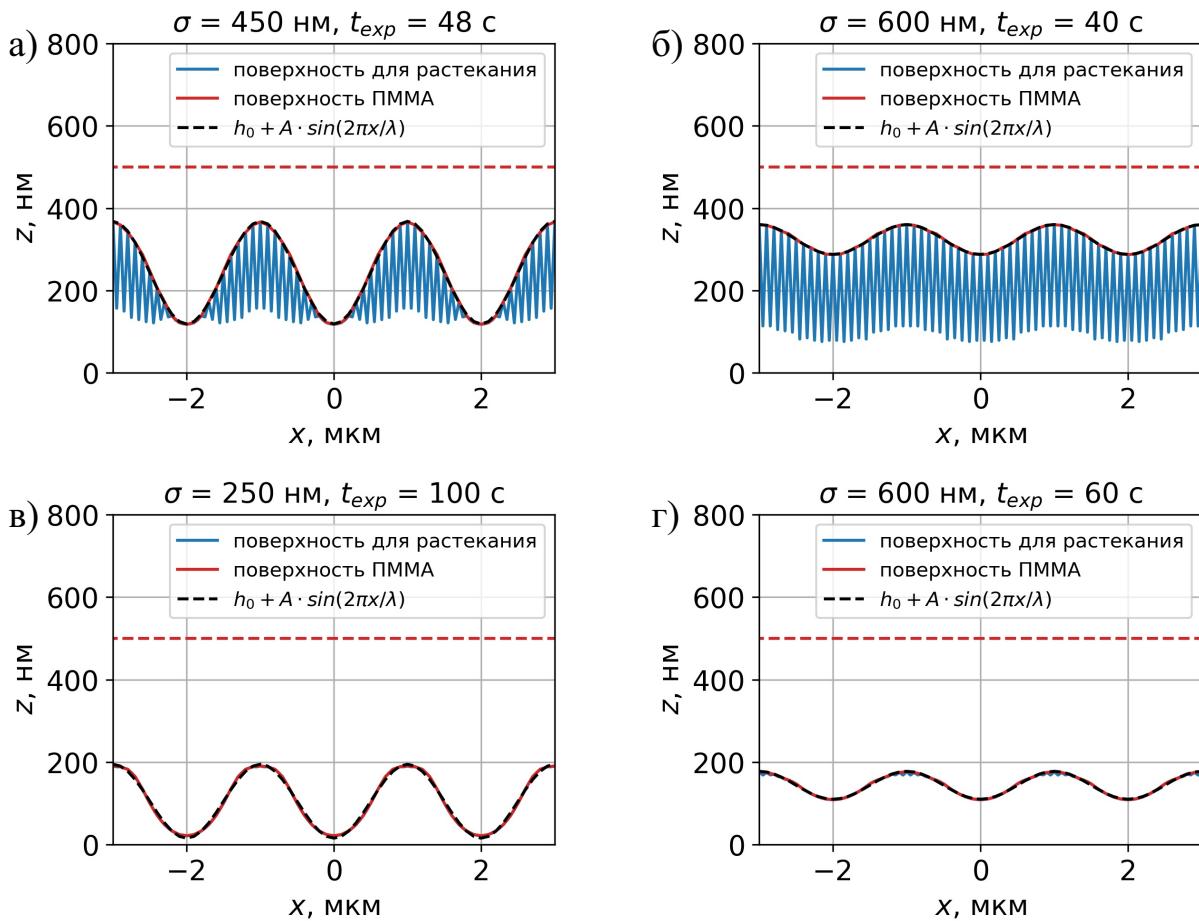


Рис. 8 — Промоделированные синусоидальные профили с периодом 2 мкм, полученные в слое ПММА с начальной толщиной 500 нм. Температура образца составляла  $T = 150^\circ\text{C}$ , ток в пучке – 4.56 нА, распределение плотности тока в пучке считается нормальным со среднеквадратичным отношением  $\sigma$ . Значения  $\sigma$  и  $t_{exp}$  подбираются для получения синусоидального профиля. После экспонирования образец а) охлаждался со скоростью 10  $^\circ\text{C}/\text{с}$ , образцы б)–г) – со скоростью 1  $^\circ\text{C}/\text{с}$ .

чески идеальный синусоидальный профиль в резисте с периодом до половины микрометра, что соответствует 2000 штрихов на 1 мм. Как показано, на рис. 8, синусоидальным профиль может быть достигнут как при полном или частичном наличии микрополостей в слое резиста (рис. 8 а), б)), так и при их отсутствии (рис. 8 в) и г)). Высота синусоидального профиля, получаемого методом СЭЛТР может варьироваться от 0 до 1500–200 нм в зависимости концентрации микрополостей в слое резисте.

Полученный в ПММА синусоидальный профиль может быть в дальнейшем покрыт металлом или перенесен в металл путем травления в реакторе индуктивно-связанной плазмы [7], что обеспечит получение отражательной синусоидальной дифракционной решетки. Таким образом, метод СЭЛТР может быть применен для получения синусоидальных дифракционных решеток с числом штрихов до 2000 1/мм, и отношением  $d/\lambda$  в диапазоне 0–0.3, что обеспечит высокую эффективность решеток и широкий рабочий диапазон.

Разработанный алгоритм моделирования линии, получаемой в процессе СЭЛТР, вообще говоря, может быть использован для определения результирующего профиля при произвольном экспонировании по области на поверхности резиста. В качестве демонстрации возможностей алгоритма были промоделированы профили, получаемые при экспонировании электронным лучом, плотность тока в котором описывалась суммой двух (рис. 9 а)) или четырех ((рис. 9 б)) функций Гаусса со среднеквадратичным отклонением 200 нм.

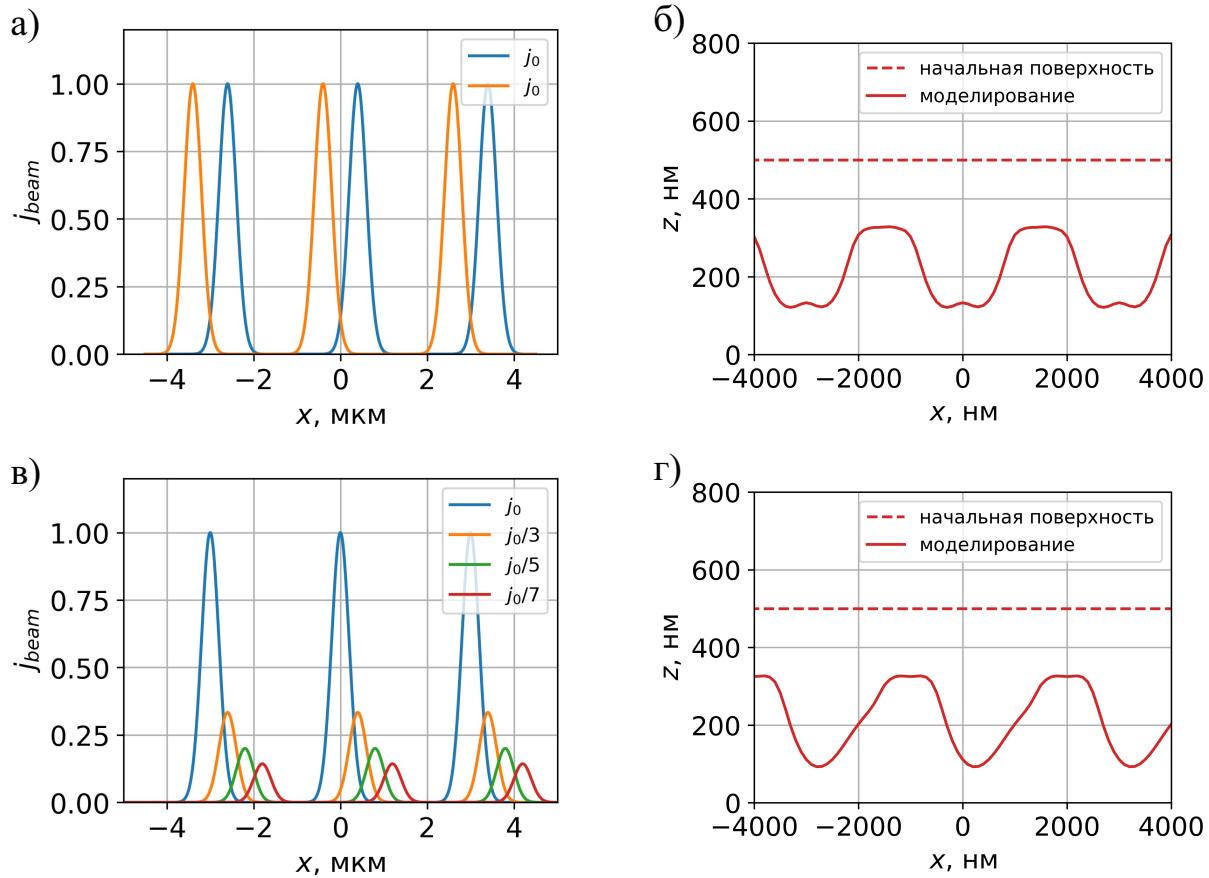


Рис. 9 – Промоделированные периодические профили с периодом 3 мкм, полученные в слое ПММА с начальной толщиной 500 нм методом СЭЛТР при экспонировании по области с различным распределением плотности тока в пучке. Температура образца при экспонировании – 150 °С/с, время экспонирования – 100 с, доза экспонирования – 3 нКл/см (доза относится к единице длины линии, экспонируемой двумя пучками в случае а) и четырьмя пучками в случае в)). Охлаждение проводилось в соответствии с экспериментальной кривой охлаждения.

## Заключение

В данной работе проводится изучение относительно нового метода формирования трехмерных микро- и наноструктур – сухого электронно-лучевого травления резиста (СЭЛТР). В основе данного метода лежит цепная реакция деполимеризации,

которая протекает при экспонировании позитивного резиста электронным лучом в условиях повышенной температуры (выше температуры стеклования резиста). Свободный мономер, образующийся в слое резисте при экспонировании в дальнейшем покидает объем травления, что приводит к образованию микрополостей. В условиях экспонирования вязкость резиста снижается до значений, при которых становится возможным растекание резиста, что приводит к заполнению микрополостей и формированию профиля линии непосредственно на стадии экспонирования. Таким образом, метод СЭЛТР является одностадийным, при этом он может быть реализован в большинстве электронно-лучевых систем с минимальными модификациями – необходимо обеспечить возможность нагрева образца и эффективное выведение или захват образующегося мономера. По сравнению с существующими методами микро- и наноструктурирования его преимущества заключаются в простоте и высокой производительности, обеспечивающей цепной деполимеризацией резиста.

До настоящего времени проводилось лишь экспериментальное исследование возможностей данного метода, которые выявили характерные особенности данного метода – сглаженный профиль всех получаемых структур и ограниченное латеральное разрешение и контраст получаемого в резисте изображения. В большинстве экспериментов проводилось экспонирование резиста “в кадр” с промежутком между линиями в несколько микрон, что продемонстрировало возможность получить в резисте волнообразный профиль глубиной в несколько сотен нанометров. Также проводились эксперименты с экспонированием по площади, в результате которых были получены ступенчатые структуры. Было продемонстрировано, что в текущем виде метод СЭЛТР может быть использован для формирования дифракционных оптических элементов, однако, низкое латеральное разрешение ограничивало область применимости метода. Поскольку при сухом электронно-лучевом травлении резиста профиль линии формируется под влиянием нескольких одновременно протекающих процессов, определение влияния каждого из них на результирующий профиль, разработка методов оптимизации метода СЭЛТР и оценка его возможностей на основе лишь экспериментальных исследований было затруднительным. Таким образом, целесообразным являлась разработка физической модели данного метода, верифицированной на основе имеющихся экспериментальных данных и позволяющей определить предельное разрешение метода, а также оценить возможность его применения для формирования необходимых структур.

Основными процессами, протекающими при СЭЛТР, являются рассеяние электронного пучка в резисте и подложке, электронно-стимулированные разрывы молекул резиста, цепная деполимеризация резиста, диффузия мономера и растекание резиста.

Несмотря на то, что их совместное протекание в процессе микроструктурирования до настоящего момента не исследовалось, большинство из них являются относительно хорошо изученными. Так, существует детальная теория упругого и неупругого рассеяния электронного пучка в веществе, различные кинетические модели термической деполимеризации полимеров, несколько способов расчета значения коэффициента диффузии мономера в слое полимера и два основных подхода к моделированию растекания полимеров. Однако, в до настоящего времени отсутствовала модель электронно-стимулированных разрывов полимерных молекул при различных температурах, модель электронно-стимулированной термической деполимеризации полимеров, а также подход к моделированию растекания полимера с неоднородным профилем вязкости, что привело к необходимости их разработки.

В основе разработанной в данной работе модели метода СЭЛТР лежит алгоритм моделирования рассеяния электронного пучка в резисте и подложке методом Монте-Карло. Используемая в нем модель для неупругого рассеяния позволяет моделировать акты электрон-электронного рассеяния, электрон-фононного рассеяния и электрон-поляронного рассеяния. В качестве приводящих к разрыву полимерных молекул рассматривались акты электрон-электронного рассеяния, и для моделирования электронно-стимулированных разрывов молекул была введена вероятность разрыва при электрон-электронном рассеянии. Ее значение для различных температур было определено путем моделирования эксперимента по определению радиационно-химического выхода разрывов на основе анализа распределения молекулярной массы проэкспонированного резиста. Моделирование слоя резиста и актов электрон-электронного рассеяния в нем позволило промоделировать распределение молекулярной массы проэкспонированного резиста при различных значениях вероятности разрыва и для каждой температуры подобрать значение, обеспечивающее соответствие между промоделированным и экспериментальным радиационно-химического выхода разрывов.

Полученный алгоритм моделирования электронно-стимулированных разрывов молекул резиста позволил промоделировать константу процесса инициирования деполимеризации в различных областях резиста. Ее значения в различные моменты времени в дальнейшем использовалось для численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих распределение молекулярной массы резиста, что позволило промоделировать изменение локальной среднечисловой молекулярной массы резиста в ходе экспонирования. Учитывая, что среднечисловая молекулярная масса резиста определяет как коэффициент диффузии мономера в слое резиста, так и его вязкость, это позволило определить локальный коэффициент диффузии мономера в слое резиста и локальную вязкость резиста для каждого момента времени при

экспонировании резиста. На основе рассчитанных значений коэффициента диффузии мономера в резисте установлено, что временем диффузии мономера из слоя резиста можно пренебречь по сравнению со временем экспонирования.

Неоднородность профиля экспонирования в методе СЭЛТР приводит к неоднородному профилю вязкости резиста, и для описания растекания резиста в методе СЭЛТР была основана модель на основе численного подхода. Для различных значений вязкости резиста были рассчитаны соответствующие значения подвижности вершин его поверхности, что позволило в дальнейшем задать распределение необходимое распределение подвижности вершин при моделировании эволюции поверхности резиста методом конечных элементов. При этом для упрощения задачи слой резиста со внутренними микрополостями представлялся в виде пилообразной структуры, объем зубьев которой под поверхностью резиста равнялся объему микрополостей.

Модели отдельных процессов, протекающих при СЭЛТР были объединены в модель метода СЭЛТР – все время экспонирования разделялось на промежутки времени величиной 1 с, и в течении одного промежутка последовательно моделировались вышеописанные процессы. При этом после экспонирования также моделировалось растекание резиста при его остывании. Для верификации разработанной модели были изготовлены образцы, полученные за счет экспонирования резиста “в кадр” в растровом электронном микроскопе при различных значениях температуры в времени экспонирования. Сравнение экспериментальных и промоделированных профилей продемонстрировало высокую точность разработанной модели, а также позволило установить среднюю длину цепи деполимеризации при различных температурах в условиях метода СЭЛТР. Важной особенностью получаемых профилей

Разработанная модель позволяет промоделировать профиль линии, получаемой методом СЭЛТР, при различных параметрах экспонирования и последующего охлаждения образца, что было использовано для детального изучения метода СЭЛТР. Было определено влияние флуктуаций параметров экспонирования и охлаждения на результирующий профиль линии, а также установлено, что предельное разрешение метода и угол наклона профиля составляют около 300 нм и 70°, соответственно. Было продемонстрировано, что при выборе оптимальных параметров экспонирования метод СЭЛТР может быть использован для получения отражательных дифракционных решеток с практически идеальным синусоидальным профилем, плотностью штрихов до 1600 1/мм и отношением  $d/\lambda$  в диапазоне 0-0.3. Также в качестве демонстрации возможностей разработанного алгоритма моделирования были приведены профили линий, полученных в резисте при экспонировании с различными распределениями дозы экспонирования по области линии, что указывает на возможность использования

алгоритма для определения параметров экспонирования, необходимых для получения структур с заданным профилем.

### **Список литературы**

1. *Grayscale lithography—automated mask generation for complex three-dimensional topography* / J. Loomis [и др.] // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. – 2016. – т. 15, № 1. – с. 013511.
2. *Additive-Free All-Carbon Composite: A Two-Photon Material System for Nanopatterning of Fluorescent Sub-Wavelength Structures* / A. Jaiswal [и др.] // ACS Nano. – 2021. – т. 15, № 9. – с. 14193–14206.
3. *Plow and ridge nanofabrication* / W. Shim [и др.] // Small. – 2013. – т. 9, № 18. – с. 3058–3062.
4. *Large-area magnetic metamaterials via compact interference lithography* / N. Feth [и др.] // Optics Express. – 2007. – т. 15, № 2. – с. 501.
5. *Chou S. Y. Nanoimprint lithography* // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. – 1996. – т. 14, № 6. – с. 4129.
6. *A new method of formation of the masking image (relief) directly during the electron-beam exposure of the resist* / M. A. Bruk [и др.] // Russian Microelectronics. – 2013. – т. 42, № 5. – с. 261–269.
7. *Formation of micro- and nanostructures with well-rounded profile by new e-beam lithography principle* / M. Bruk [и др.] // Microelectronic Engineering. – 2016. – т. 155. – с. 92–96.
8. *Радиационная деполимеризация полиметилметакрилата, адсорбированного на силохроме* / М. А. Брук [и др.] // Высокомолекулярные соединения, Серия А. – 1999. – № 2. – с. 256–262.
9. *Некоторые Особенности Нового Метода Формирования Микрорельефа Путём Прямого Электронно-Лучевого Травления Резиста* / М. Брук [и др.] // Компьютерная оптика (Computer Optics). – 2015. – т. 39, № 2. – с. 204–210.
10. *Mitreska Z., Veljanoski B. Diffraction of a Hermite - Gaussian laser beam on a thin sinusoidal phase grating* // Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A. – 1997. – т. 6, № 3. – с. 405–412.
11. *Calculations of Mott scattering cross section* / Z. Czyżewski [и др.] // Journal of Applied Physics. – 1990. – т. 68, № 7. – с. 3066–3072.

12. *Dapor M., Ciappa M., Fichtner W.* Monte Carlo modeling in the low-energy domain of the secondary electron emission of polymethylmethacrylate for critical-dimension scanning electron microscopy // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. – 2010. – т. 9, № 2. – с. 023001.
13. *Geant4 physics processes for microdosimetry simulation: Very low energy electromagnetic models for electrons in silicon / A. Valentin [и др.]* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2012. – т. 288. – с. 66–73.
14. *Greeneich J. S. Impact of electron scattering on linewidth control in electron-beam lithography // Journal of Vacuum Science and Technology.* – 1979. – т. 16, № 6. – с. 1749–1753.
15. *Aktary M., Stepanova M., Dew S. K. Simulation of the spatial distribution and molecular weight of polymethylmethacrylate fragments in electron beam lithography exposures // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures.* – 2006. – т. 24, № 2. – с. 768.
16. *Vrentas J. S., Duda J. L., Ling H. .-C. Influence of the glass transition on solvent self-diffusion in amorphous polymers // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics.* – 1988. – т. 26, № 5. – с. 1059–1065.
17. *Modeling of low-temperature depolymerization of poly (methyl methacrylate) promoted by ion beam / A. Raudino [и др.]* // The Journal of Chemical Physics. – 1999. – т. 111, № 4. – с. 1721–1731.
18. *Estimating diffusion coefficients for small molecules in polymers and polymer solutions / O. Karlsson [и др.]* // Polymer. – 2001. – т. 42, № 11. – с. 4915–4923.
19. *Thin polymer films viscosity measurements from nanopatterning method / T. Leveder [и др.]* // Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2010. – т. 28, № 6. – с. 1251–1258.
20. *Kirchner R., Schift H. Mobility based 3D simulation of selective , viscoelastic polymer reflow using surface evolver Mobility based 3D simulation of selective , viscoelastic polymer reflow.* – 2014.
21. *Boyd R. H., Lin T.-P. Theoretical Depolymerization Kinetics. III. The Effect of Molecular-Weight Distribution in Degrading Polymers Undergoing Random-Sission Initiation // The Journal of Chemical Physics.* – 1966. – т. 45, № 3. – с. 778–781.

22. *Mita I., Obata K., Horie K.* Photoinitiated Thermal Degradation of Polymers II. Poly(methyl methacrylate) // Polymer Journal. — 1990. — т. 22, № 5. — с. 397—410.
23. *Mermin N. D.* Lindhard Dielectric Function in the Relaxation-Time Approximation // Physical Review B. — 1970. — т. 1, № 5. — с. 2362—2363.
24. Comprehensive model of electron energy deposition / G. Han [и др.] // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. — 2002. — т. 20, № 6. — с. 2666.
25. *Charlesby A., Moore N.* Comparison of gamma and ultra-violet radiation effects in polymethyl methacrylate at higher temperatures // The International Journal of Applied Radiation and Isotopes. — 1964. — т. 15, № 12. — с. 703—708.
26. *Kotliar A. M.* Evaluation of molecular weight averages resulting from random chain scission process for wide distributions as in polyolefins // Journal of Polymer Science Part A: General Papers. — 1964. — т. 2, № 3. — с. 1057—1067.
27. *Aho J., Syrjälä S.* On the measurement and modeling of viscosity of polymers at low temperatures // Polymer Testing. — 2008. — т. 27, № 1. — с. 35—40.
28. *Berens A., Hopfenberg H.* Diffusion of organic vapors at low concentrations in glassy PVC, polystyrene, and PMMA // Journal of Membrane Science. — 1982. — т. 10, № 2/3. — с. 283—303.
29. *Bueche F.* Viscoelasticity of Poly Methacrylates // Journal of Applied Physics. — 1955. — июнь. — т. 26, № 6. — с. 738—749.
30. *Brakke K. A.* The Surface Evolver // Experimental Mathematics. — 1992. — т. 1, № 2. — с. 141—165.

### **Публикации автора по теме диссертации**

- A1. 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. — т. 41, № 4. — с. 499—503.
- A2. Fabrication of microlens arrays and planar photonic crystals using thermal amplification of resist / F. Sidorov, M. Bruk, E. Zhikharev, A. Rogozhin. — 2018.
- A3. Simulation of dry e-beam etching of resist and experimental evidence / A. Rogozhin, F. Sidorov, M. Bruk, E. Zhikharev. — 2019.

- A4. *Sidorov F., Rogozhin A.* Detailed Monte-Carlo simulation of PMMA chain scissions in e-beam lithography. — 2019.
- A5. *Rogozhin A., Sidorov F.* E-beam lithography simulation techniques // Russian Microelectronics. — 2020. — т. 49, № 2. — с. 108—122.
- A6. Direct Monte-Carlo simulation of dry e-beam etching of resist / F. Sidorov, A. Rogozhin, M. Bruk, E. Zhikharev // Microelectronic Engineering. — 2020. — т. 227. — с. 111313.
- A7. *Sidorov F., Rogozhin A.* Microscopic simulation of e-beam induced PMMA chain scissions with temperature effect. — 2020.
- A8. *Sidorov F., Rogozhin A.* New microscopic approach to e-beam lithography simulation. — 2020.
- A9. *Isaev A., Sidorov F., Rogozhin A.* Influence of Resist Spreading during Its Dry Electron-Beam Etching on a Lateral Resolution // Russian Microelectronics. — 2021. — т. 50, № 1. — с. 19—23.