ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.326.07 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (РТУ МИРЭА) МИНОБРНАУКИ РОССИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ решение диссертационного совета от 16.11.2023 №21

О присуждении Сидорову Федору Алексеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Физические механизмы сухого электронно-лучевого травления» в виде рукописи по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физико-технологическом институте им. К.А. Валиева Российской академии наук», принята к защите 31 августа 2023 года, протокол № 15, диссертационным советом 24.2.326.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), Минобрнауки РФ, Москва, 119454, проспект Вернадского, 78. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 22 человека приказом от 26.01.2023 (№ 86/нк).

 Соискатель Сидоров Федор Алексеевич 1992 года рождения, гражданин Российской Федерации. В 2016 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)». Присуждена квалификация магистра по направлению подготовки 03.04.01 «Прикладные математика и физика». В 2020 году Ф.А. Сидоров окончил очную аспирантуру МФТИ по направлению подготовки 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи». Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана МФТИ в 2023 году. Начиная с 2015 года Ф.А. Сидоров работает в Лаборатории микроструктурирования и субмикронных приборов ФТИАН им. К.А. Валиева РАН в должности инженера, с 2020 года – младшего научного сотрудника.

Научный руководитель – Рогожин Александр Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории технологий электронной и оптической литографии Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН.

Официальные оппоненты:

1. Зайцев Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории теоретической физики Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН.

2. Чесноков Сергей Артурович, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией фотополимеризации и полимерных материалов Института металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН.

 Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-производственный комплекс «Технологический центр» в своем положительном заключении, составленном Кицюком Евгением Павловичем, кандидатом технических наук, начальником научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» и утвержденном Светухиным Вячеславом Викторовичем, доктором физико-математических наук, профессором, членом-корреспондентом РАН, директором НПК «Технологический центр» указала, что диссертационная работа Сидорова Ф.А. была рассмотрена и получила положительную оценку на заседании НТС НПК «Технологический центр» (протокол НТС № 8 от 10.10.2023 г.), удовлетворяет требованиям п.п. 9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

В обсуждении диссертационной работы приняли участие: Юрасов А.Н., Пасечник С.В., Китаева Г.Х., Мишина Е.Д., Блантер М.С.

 Соискатель имеет 10 опубликованных работ по теме диссертации в научных журналах и изданиях, рецензируемых РИНЦ, Scopus, Web of Science и рекомендованных ВАК. Результаты работы были апробированы на 11 всероссийских и международных конференциях.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем Ф.А. Сидоровым работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. 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. **(Web of Science, Scopus)**

2. Fabrication of microlens arrays and planar photonic crystals using thermal amplification of resist / **F. Sidorov**, M. Bruk, E. Zhikharev, A. Rogozhin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – т. 1096, № 1. – с. 012018. **(Scopus)**

3. Simulation of dry e-beam etching of resist and experimental evidence / A. Rogozhin, **F. Sidorov**, M. Bruk, E. Zhikharev // International Conference on Micro-and NanoElectronics 2018. – 2019. – т. 11022. – с. 440–444. **(Scopus)**

4. **Sidorov F.**, Rogozhin A. Detailed Monte-Carlo simulation of PMMA chain scissions in e-beam lithography // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – т. 1410, № 1. – с. 012243. **(Scopus)**

5. Рогожин А. Е., **Сидоров Ф. А.** Моделирование процессов электронно-лучевой литографии // Микроэлектроника. – 2020. – т. 49, № 2. – с. 116–132. 20 **(ВАК, Scopus)**

6. 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. **(Web of Science, Scopus)**

7. **Sidorov F.**, Rogozhin A. Microscopic simulation of e-beam induced PMMA chain scissions with temperature effect // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. т. 1695, № 1. – с. 012202. **(Scopus)**

8. **Sidorov F.**, Rogozhin A. New microscopic approach to e-beam lithography simulation // 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – 2020. – с. 1–4. **(Scopus)**

9. Исаев А. Г., **Сидоров Ф. А.**, Рогожин А. Е. Влияние растекания резиста при его сухом электронно-лучевом травлении на латеральное разрешение // Микроэлектроника. – 2021. – т. 50, № 1. – с. 21–26. **(ВАК, Scopus)**

10. Рогожин А. Е., **Сидоров Ф. А.** Сечения процессов рассеяния при электроннолучевой литографии // Микроэлектроника. – 2023. – т. 52, № 2. – с. 110126. **(ВАК, Scopus)**

По результатам работы зарегистрированы три программы для ЭВМ 3 программы для ЭВМ, разработанные в рамках работы (№ 2019611985, № 2023665024, № 2023665031).

На автореферат поступило 4 отзыва:

1. От А.В. Шишлянникова, кандидата физико-математических наук, начальника лаборатории отдела спецматериалов АО «НИИМЭ» – отзыв положительный, замечаний нет.

2. От В.Н. Решетова, доктора физико-математических наук, профессора НИЯУ МИФИ, старшего научного сотрудника лаборатории «Прикладная ионная физика и масс-спектрометрия» НИЯУ МИФИ – отзыв положительный. Серьезных замечаний по содержанию и оформлению автореферата диссертации нет, в качестве несущественного замечания отмечается минимальность представления полученных в диссертации аналитических результатов в тексте автореферата. Также отмечается явно излишнее количество значащих цифр в формуле 4 на 12 странице автореферата и указывается, что коэффициент 26,14 в формуле, содержащей знак “приблизительно равно” вполне можно округлить до 26.

3. От А.А. Резванова, кандидата физико-математических наук, начальника лаборатории АСО АО «НИИМЭ» – отзыв положительный. В отзыве присутствует замечание и вопрос:

 а) При моделировании электронно-стимулированного разрыва используется условия данного события при сравнении случайного числа из диапазона [0, 1) с заданной вероятностью ps, которая меняется от 0.045 до 0.105, при росте температуры от 0 до 200 °C. Однако, не совсем ясно, какая динамика изменения ps от температуры и какие значения ps в промежуточных точках, так как последующая верификация модели с экспериментом проводилась при 130 и 150 °C.

 б) Насколько просто перенести разработанный подход моделирования СЭЛТР ПММА на другие резисты?

4. От Н.А. Небогатиковой, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника Института физики полупроводников СО РАН – отзыв положительный. В отзыве присутствуют следующие замечания:

а) В автореферате не достаточно информации о том, как происходит эволюция микрополостей, хотя о них говорится на стр. 11 и 15, также они приведены на рисунке 3 на стр. 13.

б) На странице 14 говорится, что в эксперименте температура подложки, в экспериментах, варьировалась от 130 до 150 °C. Однако не приведено обоснование выбора именного такого выбора температурного диапазона.

в) Одна из задач работы формулировалась как “Используя созданную модель, разработать метод определения параметров СЭЛТР <…> для формирования необходимого профиля”, об этом же говорится на стр. 19, но в тексте автореферата не приведено достаточно информации о том, как была решена эта задача.

В каждом из отзывов отмечается, что сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что в результате выполненных соискателем исследований:

1. Разработана физическая модель сухого электронно-лучевого травления резиста (СЭЛТР), учитывающие процессы рассеяния электронного пучка в резисте и подложке, электронно-стимулированные разрывы молекул резиста, электронно-стимулированную термическую деполимеризацию резиста, диффузию мономера и процессы растекания; в ходе разработки модели СЭЛТР были созданы новые модели для процессов электронно-стимулированных разрывов полимерных молекул, электронно-стимулированной термической деполимеризации полимеров и растекания полимерных структур с неоднородным профилем вязкости.

2. На основе разработанной модели СЭЛТР реализован алгоритм моделирования, позволяющий определить профиль линии, получаемой методом СЭЛТР при произвольных параметрах экспонирования и последующего охлаждения образца – тока, энергии и профиля электронного пучка, температуры подложки, скорости охлаждения подложки.

3. Для разработанной модели СЭЛТР проведена верификация, состоявшая в сравнении профилей, полученных методом СЭЛТР в различных экспериментах, и профилей, полученных при моделировании с соответствующими параметрами процесса СЭЛТР; верификация продемонстрировала высокую точность разработанной модели.

4. На основе разработанной модели СЭЛТР предложены способы повышения латерального разрешения метода СЭЛТР и аспектного отношения структур, получаемых этим методом; были получены оценки для величины предельного разрешения метода СЭЛТР и максимального угла наклона стенок линии, получаемой этим методом.

5. Теоретически определено влияние параметров процесса СЭЛТР, а также их флуктуаций, на профиль получаемой линии; сформулированы требования к стабильности параметров процесса для получения необходимого профиля.

6. На основе разработанной модели СЭЛТР предложен метод подбора параметров процесса СЭЛТР для получения необходимого профиля; теоретически продемонстрирована возможность формирования методом СЭЛТР синусоидальных дифракционных и голографических элементов.

Научная ценность полученных результатов обусловлена получением новых научных знаний, представляющих интерес для фундаментальных и прикладных исследований. В работе впервые:

1. Проведено исследование процесса формирования канавки с помощью электронно-стимулированной термической деполимеризации резиста и показано, как параметры процесса влияют на профиль канавки.

2. Предложена микроскопическая модель электронно-стимулированных разрывов молекул ПММА, описывающая наблюдаемое экспериментально увеличение радиационно-химического выхода разрывов за счет увеличения вероятности разрыва молекулы при электрон-электронном рассеянии.

3. Разработан подход к моделированию растекания резиста с неоднородным профилем вязкости, состоящий в определении подвижности вершин поверхности резиста на основе распределения вязкости резиста.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что впервые была создана модель формирования рельефа в резисте за счёт совместного протекания основных процессов, характерных для метода СЭЛТР – рассеяния электронного пучка, электронно-стимулированных разрывов молекуцл резиста, термической деполимеризации резиста, диффузии мономера и растекания резиста.

Практическая значимость работы заключается в том, что на основе разработанной модели процесса СЭЛТР был предложен метод определения параметров процесса (тока, энергии и профиля электронного пучка, температуры подложки и скорости охлаждения подложки) для формирования заданного профиля. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при проведении технологических процессов изготовления структур микроэлектроники, фотоники и микрофлюидики и др.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается корректным использованием существующих моделей и методов моделирования, согласием между результатами экспериментов и моделирования, а также соответствием полученных результатов с результатами, приведенными другими авторами в литературе по теме данного исследования.

Личный вклад автора заключается в разработке физической модели процесса СЭЛТР, ее программной реализации в виде алгоритма моделирования профиля линии, получаемой этим методом, планировании экспериментов для верификации разработанной модели, а также использовании модели для теоретического исследования процесса СЭЛТР.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

В ходе защиты соискатель Ф.А. Сидоров дал аргументированные ответы на заданные вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 16.11.2023 диссертационный совет принял решение присудить Сидорову Федору Алексеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени – 16, против присуждения учёной степени – 0, недействительных бюллетеней – 1.

Зам. председателя

диссертационного совета А.Н. Юрасов

Учёный секретарь

диссертационного совета Л.Ю. Фетисов

16.11.2023 г.