

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

ФТИАН им. К.А. Валиева РАН,

чл.-кор. РАН В.Ф. Лукичев,



«19» мая 2023 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института им. К.А. Валиева Российской академии наук (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН) по диссертационной работе Сидорова Федора Алексеевича на тему «Физические механизмы сухого электронно-лучевого травления», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»

Диссертационная работа выполнена в лаборатории Микроструктурирования и субмикронных приборов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института им. К.А. Валиева Российской академии наук (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН).

Сидоров Ф.А. (1992 г.р.) в 2014 году окончил Факультет общей и прикладной физики (присвоена квалификация «Бакалавр» по направлению подготовки 010900 «Прикладные математика и физика») и в 2016 году – магистратуру Факультета физической и квантовой электроники (присвоена квалификация «Магистр» по направлению подготовки 03.04.01 «Прикладные математика и физика», диплом с отличием) Московского физико-технического института. В 2016 году поступил в очную аспирантуру Московского физико-технического института по направлению подготовки 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи», которую окончил в 2020 году. Также,



начиная с 2015 года работал 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, руководитель лаборатории Технологий электронной и оптической литографии ФТИАН им. К.А. Валиева РАН.

### ВЫПИСКА

из протокола № 03-1/23 от 18 апреля 2023 г. заседания научного семинара «Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники» в Физико-технологическом институте им. К.А. Валиева РАН

**ПРИСУТСТВОВАЛИ:** В работе семинара под председательством директора ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, чл.корр. РАН В.Ф. Лукичева приняли участие 18 человек: зам. директора ФТИАН им. К.А. Валиева РАН по научной работе, д.ф.-м.н. К.В. Руденко; рук. лаборатории ФДМ, к.ф.м.н. Мяконьких А.В.; рук. лаборатории ТЭОЛ, к.ф.м.н. А.Е. Рогожин; рук. лаборатории ИЛТ, к.ф.м.н. В.П. Кудря; рук. лаборатории ФПМС, д.ф.м.н. М.А. Чуев; ученый секретарь Института, к.ф.м.н. И.А. Хорин; в.н.с., д.ф.-м.н. А.А. Ломов, в.н.с., к.ф.-м.н. В.В. Вьюрков; с.н.с. к.ф.м.н. Симонов Н.А, н.с. к.ф.м.н. Татаринцев А.А., с.н.с., к.т.н. Ю.Ф. Семин и другие.

**СЛУШАЛИ:** Доклад по диссертационной работе Сидорова Федора Алексеевича на тему «Физические механизмы сухого электронно-лучевого травления», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

В ходе обсуждения к.ф.-м.н. Рогожин А.Е., являющийся научным руководителем Сидорова Ф.А., сообщил, что во время работы над



диссертацией соискатель проявил себя как специалист, владеющий глубокими теоретическими знаниями и необходимым практическим опытом. Рогожин А.Е. указал на актуальность выполненной работы и высокую практическую значимость полученных результатов, а также на тот факт, что Сидоров Ф.А. выполнил поставленные перед ним задачи самостоятельно. Опубликованные соискателем работы достаточно полно отражают содержание диссертации. По мнению Рогожина А.Е., работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и ее следует рекомендовать к защите.

С положительной оценкой работы также выступили:

- директор, чл.-кор. РАН, д.ф.-м.н. В.Ф. Лукичев;
- в.н.с., к.ф.-м.н. В.П. Кудря;
- в.н.с., к.ф.-м.н. В.В. Вьюрков;

**ПОСТАНОВИЛИ:** рекомендовать диссертацию Сидорова Ф.А. «Физические механизмы сухого электронно-лучевого травления» к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» и утвердить заключение, содержащее общую характеристику диссертационной работы.

#### **Актуальность темы**

Формирование трехмерных микро- и наноструктур является ключевым процессом во множестве областей, таких как микроэлектроника, микро- и наноинженерия, дифракционная оптика и нанофотоника, микро- и нанофлюидика и др. Несмотря на то, что в настоящее время существует множество методов микро- и наноструктурирования, для отдельно взятого метода такие преимущества, как универсальность, высокая



производительность и доступность зачастую оказываются взаимоисключающими. Универсальные методы с высоким разрешением предполагают использование сложного высокоточного оборудования и обладают при этом достаточно низкой производительностью. В свою очередь, более производительные и доступные методы позволяют получить только периодические структуры, либо структуры определенного вида. Таким образом, в настоящее время отсутствует метод получения произвольных микро- и наноструктур, являющийся одновременно высокопроизводительным и относительно простым в реализации.

Ввиду вышеописанных особенностей основных существующих методов микроструктурирования внимания заслуживает относительно новый одностадийный литографический метод формирования рельефа в слое позитивного резиста – сухое электронно-лучевое травление резиста (СЭЛТР). В его основе лежит реакция цепной термической деполимеризации позитивного полимерного резиста, протекающая в процессе экспонирования резиста электронным лучом при температурах выше температуры стеклования и обеспечивающая самопроявление изображения непосредственно при экспонировании. Отличительными особенностями метода СЭЛТР являются исключительно высокая чувствительность резиста, высокое разрешение по вертикали, возможность формирования рельефа без этапа проявления, а также скругленный профиль получающегося рельефа. Высокая чувствительность резиста обеспечивает производительность метода, в десятки раз превышающую производительность обычной электронно-лучевой литографии. Благодаря этим особенностям метод СЭЛТР может быть использован для формирования различных микро- и наноэлектромеханических систем, оптоэлектронных приборов, дифракционных и голографических оптических элементов, различных трехмерных микро- и наноструктур или масок. Также возможной областью его применения является формирование каналов для микрофлюидных



устройств, поскольку сглаженный профиль канала положительно скажется на гидравлическом диаметре канала. Однако, латеральное разрешение метода СЭЛТР и контраст изображения, получаемого этим методом, ограничены. До настоящего времени при использовании электронно-лучевых систем с диаметром электронного луча около 10-15 нм с помощью метода СЭЛТР удавалось получать канавки с минимальной шириной 300-400 нм и максимальным углом наклона стенок около 20°. В силу одновременного протекания при СЭЛТР множества различных процессов точный механизм формирования конечного профиля линии не был понятен, что не позволяло выявить пути оптимизации данного метода. Таким образом, целесообразным являлось создание физической модели метода СЭЛТР, которая позволила бы определить возможности метода и оптимизировать его для применения в различных областях.

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

1. Впервые создана модель сухого электронно-лучевого травления резиста, учитывающая рассеяние электронного пучка, электронно-стимулированные разрывы молекул резиста, процессы деполимеризации, диффузии и растекания и позволяющая определить профиль линии, получаемый при заданных условиях процесса.
2. Определены минимальная ширина и максимальный угол наклона стенок канавки, получаемой методом СЭЛТР при экспонировании в линию – 300 нм и 70° соответственно.
3. Определено влияние флуктуаций параметров процесса СЭЛТР на конечную форму профиля, продемонстрирована возможность формирования методом СЭЛТР синусоидальных дифракционных и голографических элементов.



## Научная новизна

1. Впервые проведено исследование процесса формирования канавки с помощью электронно-стимулированной термической деполимеризации резиста и показано, как параметры процесса влияют на профиль канавки.
2. Предложена модель температурной зависимости радиационно-химического выхода разрывов ( $G_s$ ) молекул ПММА – увеличение  $G_s$  с ростом температуры от 0 до 200 °С может быть описано за счет увеличения вероятности разрыва молекулы при электрон-электронном рассеянии от 0.045 до 0.105.
3. Разработан 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:  $\mu \approx 26.14/\eta$ .

## Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в том, что был разработан метод определения тока, энергии и профиля электронного пучка, температуры подложки и скорости охлаждения подложки в методе СЭЛТР для формирования произвольных трехмерных структур с профилем, задающимся дифференцируемой функцией.

## Личный вклад автора

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



## **Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите**

Содержание диссертационной работы соответствует пунктам 1 и 4 паспорта специальности 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

## **Полнота изложения материалов в печати**

Основные результаты работы Сидорова Ф.А. изложены в девяти статьях, опубликованных в рецензируемых международных журналах, включённых в библиографические базы (РИНЦ, Scopus, Web of Science). Также была зарегистрирована программа для ЭВМ «Программа моделирования воздействия электронного пучка на полимеры при различных температурах с учетом процессов деполимеризации» (№ 2019611985).

## **Заключение**

Научный семинар «Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники» ФТИАН им. К.А. Валиева РАН после обсуждения диссертационной работы Сидорова Ф.А. оценивает ее как научную квалификационную работу, которая по актуальности, объему, новизне и значимости результатов полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертационная работа Сидорова Ф.А. отвечает всем требованиям п.п. 9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям, так как является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знания.

Исходя из вышесказанного, следует рекомендовать диссертацию Сидорова Ф.А. «Физические механизмы сухого электронно-лучевого травления» к

защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в Диссертационном совете 24.2.326.07 при РТУ МИРЭА по специальности 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Ученый секретарь ФТИАН им. К.А. Валиева РАН

к.ф.м.н.

  
\_\_\_\_\_

И.А. Хорин

подпись

ФТИАН им. К.А. Валиева РАН,

117218, Россия, Москва, Нахимовский проспект д.36 к.1

телефон: +7 (499) 129-54-92, факс: +7 (499) 125-38-26,

e-mail: ftian.director@bk.ru, lukichev@ftian.ru