

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.340.01, СОЗДАННОГО НА
БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 25.12.2024 № 18

О присуждении Окулич Евгении Викторовне, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Ионно-лучевая модификация параметров мемристоров на основе SiO_x и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ и имитационное моделирование их радиационной стойкости» по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, принята к защите 21 октября 2024 г. (протокол заседания № 13) диссертационным советом 24.2.340.01, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, приказ от 11.04.2012 г. №105/нк о создании диссертационного совета.

Соискатель Окулич Евгения Викторовна, 17 января 1992 года рождения. В 2014 году соискатель окончила федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», в 2018 году закончила освоение программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре очной формы обучения по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» федерального государственного автономного образовательного

учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», работает в должности младшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории «Лаборатория мемристорной наноэлектроники» Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» отдела фундаментальных и прикладных исследований федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в Научно-образовательном центре «Физика твердотельных наноструктур» отдела фундаментальных и прикладных исследований федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, профессор Тетельбаум Давид Исаакович, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Научно-исследовательский физико-технический институт, ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии тонких пленок отдела твердотельной электроники и оптоэлектроники.

Официальные оппоненты:

1. Ситников Александр Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», кафедра твердотельной электроники, профессор;
2. Хайбуллин Рустам Ильдусович, кандидат физико-математических наук, без ученого звания, Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского — обособленное структурное подразделение Федерального государственного

бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», лаборатория радиационной физики, старший научный сотрудник,
дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, в своем **положительном отзыве**, подписанном Бурковским Романом Георгиевичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом, Институт электроники и телекоммуникаций, и.о. директора высшей инженерно-физической школы, подготовленном и подписанном Карасевым Платоном Александровичем, доктором физико-математических наук, доцентом, Институт электроники и телекоммуникаций, профессором высшей инженерно-физической школы, и утвержденном Сергеевым Виталием Владимировичем, доктором технических наук, профессором, первым проректором, указала, что «В диссертации впервые экспериментально установлено, что улучшение значений рабочих параметров мемристора и снижение их разброса может быть достигнуто при помощи ионного облучения... Выполнен большой объем работы по моделированию процессов ионно-лучевой модификации исследуемых оксидов и их отжига и получены ранее неизвестные данные о образовании при этом различных комплексов... Впервые предложен и опробован имитационный подход к исследованию радиационной стойкости мемристорных структур к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами, основанный на облучении ионами средних энергий... диссертация «Ионно-лучевая модификация параметров мемристоров на основе SiO_x и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ и имитационное моделирование их радиационной стойкости» полностью соответствует требованиям Раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Окулич Евгения Викторовна, заслуживает присуждения ей степени кандидата физико-

математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Соискатель имеет 85 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 42 работы, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 7 работ. В публикациях соискателя по теме диссертации представлены основные научные результаты исследований влияния ионного облучения на мемристорные структуры на основе оксидов (SiO_x , $\text{ZrO}_2(\text{Y})$). В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации – публикации в научных журналах, входящих в Перечень ВАК, и/или индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus:

1. Влияние облучения ионами H^+ и Ne^+ на резистивное переключение в мемристивных структурах «металл-диэлектрик-металл» на основе SiO_x / А.И. Белов, А.Н. Михайлов, Д.С. Королев, В.А. Сергеев, Е.В. Окулич, И.Н. Антонов, А.П. Касаткин, Е.Г. Грязнов, А.П. Ятманов, О.Н. Горшков, Д.И. Тетельбаум // Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т.41, №19. – С.81-89.

Вклад соискателя: в проведении расчета (по разработанной коллегами методике) ионизационных и упругих потерь и параметров облучения при имитации радиационной стойкости мемристоров к облучению космическими протонами.

2. Medium-energy ion-beam simulation of the effect of ionizing radiation and displacement damage on SiO_2 -based memristive nanostructures / A. Belov, A. Mikhaylov, D. Korolev, D. Guseinov, E. Gryaznov, E. Okulich, V. Sergeev, I. Antonov, A. Kasatkin, O. Gorshkov, D. Tetelbaum, V. Kozlovski // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 2016. – Vol.379. – P.13-17. DOI: 10.1016/j.nimb.2016.02.054.

Вклад соискателя: в проведении расчета (по разработанной коллегами методике) ионизационных и упругих потерь и параметров облучения при имитации радиационной стойкости мемристоров к облучению не только космическими протонами, но и реакторными нейтронами.

3. Влияние облучения ионами Si^+ на резистивное переключение мемристивных структур на основе стабилизированного диоксида циркония / Е.В. Окулич, М.Н. Коряжкина, Д.С. Королев, А.И. Белов, М.Е. Шенина, А.Н. Михайлов,

Д.И. Тетельбаум, И.Н. Антонов, Ю.А. Дудин // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т.45, №14. – С.3-6. DOI: 10.21883/PJTF.2019.14.48012.17807.

Вклад соискателя: участие в экспериментах по измерению ВАХ мемристивных устройств на основе диоксида циркония, подвергнутых облучению ионами кремния, а также в обработке и анализе полученных данных.

4. Effect of ion irradiation on resistive switching in metal-oxide memristive nanostructures / A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.S. Korolev, S.A. Gerasimova, I.N. Antonov, E.V. Okulich, R.A. Shuiskiy, D.I. Tetelbaum // J. Phys.: Conference Series. – 2019. – Vol.1410. – P.012245. DOI: 10.1088/1742-6596/1410/1/012245.

Вклад соискателя: планирование эксперимента по влиянию на параметры мемристора на основе оксида кремния разделенных каскадов смещения при облучении его ионами ксенона низких энергий.

5. Влияние кислородных вакансий на формирование и структуру филамента в мемристорах на основе диоксида кремния / Е.В. Окулич, В.И. Окулич, Д.И. Тетельбаум // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т.46, №1. – С.24-27. DOI: 10.21883/PJTF.2020.01.48859.18003.

Вклад соискателя: в разработке методики расчета, а также алгоритмов и программ по нахождению условий облучения оксида кремния ионами ксенона с разделением каскадов смещения и проведению эксперимента, а также молекулярно-динамическое моделирование структурных изменений в области филамента в результате данного облучения.

6. Simulation of initial stage of silicon cluster formation during post-annealing of memristive structures based on silicon oxide films subjected to Si^+ implantation / E.V. Okulich, V.I. Okulich, D.I. Tetelbaum, A.N. Mikhaylov // Materials Letters. – 2022. – Vol. 310. – P. 131494. – DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131494.

Вклад соискателя: в создании модельной структуры $\text{SiO}_{1.7}$ (насыщение дефектами и имплантированными ионами Si^+ структуры SiO_x на основе кинетического метода Монте-Карло) и проведении расчетов эволюции этой структуры в процессе отжига методом молекулярной динамики, а также в создании программ и обработке полученных данных.

7. Молекулярно-динамическое моделирование структурных превращений

в проводящем канале мемристоров на основе нестехиометрического и ионно-облученного оксидов кремния / Е. В. Окулич, В. И. Окулич, И. К. Гайнуллин, Д. И. Тетельбаум, А. Н. Михайлов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. – 2024. – №79(5). – С. 2450501.

Вклад соискателя: в создании модельных структур (насыщение дефектами и имплантированными ионами структуры SiO_x на основе кинетического метода Монте-Карло) и проведении расчетов эволюции указанных структур в процессе отжига методом молекулярной динамики, в создании программ для обработки полученных данных, а также в анализе полученных результатов.

На автореферат диссертации поступило 7 отзывов:

1. Баталов Рафаэль Ильясович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории интенсивных радиационных воздействий Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», отмечает в своем отзыве: «В диссертации Окулич Е.В. проведено экспериментальное и теоретическое исследование физических процессов в пленках оксида кремния и диоксида циркония, а также в мемристорных структурах на их основе для улучшения и воспроизводимости их рабочих параметров. Также проводились разработка и реализация ионно-лучевого метода испытаний стойкости мемристоров к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами. Выбранная автором тематика работы является востребованной и актуальной для создания изделий микро- и нанoeлектроники, функционирующих в т.ч. в экстремальных условиях (космос, радиация)». Отзыв содержит замечания: «1) в разделе Апробация говорится о двух пособиях и одном свидетельстве на программу ЭВМ, однако в списке авторских работ их нет. 2) каким методом была получена структура $\text{Au/SiO}_2/\text{TiN/Ti}$? На какой подложке? 3) На рисунках 6 и 7 структуры отличаются лишь тонкой прослойкой циркония. В чем её роль? 4) На рис.6 параметр бета составляет 13.94 и 13.98, но в тексте написано про 9-14.» Также отмечено, что «Вместе с тем указанные недостатки не снижают

научной и практической значимости диссертационной работы, а ответы на эти вопросы, вероятно, имеются в тексте самой диссертации.». «В целом, выполненная диссертационная работа представляет собой законченное, апробированное исследование, в котором получены новые оригинальные данные, представляющие интерес с точки зрения развития электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники.». Отзыв положительный.

2. Быков Павел Владимирович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электронной структуры поверхности отдела физики и химии поверхности Физико-технического института федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», в своем отзыве отметил, что «Актуальность работы Окулич Е.В. определяется практической значимостью создания мемристивных устройств памяти на основе диоксида кремния и других металл-оксидных структур.». Отзыв содержит одно замечание: «В тексте автореферата на странице 11 указано, что было проведено исследование структур на основе SiO_2 с нижним электродом из TiN методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и было установлено взаимное проникновение атомов Si, Ti, и N на границе SiO_2/TiN . Отсутствие анализа влияния взаимного проникновения атомов на результаты измерения ВАХ, по моему мнению, несколько обедняет автореферат.». Также отмечено, что «Диссертация «Ионно-лучевая модификация параметров мемристоров на основе SiO_x и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ и имитационное моделирование их радиационной стойкости» является серьезной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне». Отзыв положительный.

3. Волкова Екатерина Ивановна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела разработки изделий и технологий микросистемной техники «Научно-исследовательского института измерительных систем им. Ю.Е. Сedaкова» – филиала федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», в своем отзыве отмечает: «Поставленные задачи автор решает, совмещая

методы компьютерного моделирования (в пакетах SRIM, LAMMPS, а также применяя оригинальные самостоятельно разработанные программы) и аналитические методы исследования, традиционные для исследования микро- и наноразмерных систем (измерения вольт-амперных характеристик мемристивных структур до и после ионного облучения, метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для исследования элементного состава пленок и характера химических связей в них). ... Результаты работы целесообразно использовать при отработке технологии мемристивных структур и микросхем, имеющих в составе мемристоры, в т.ч. и на реальном производстве. Практическая значимость диссертационного исследования очевидна...». Отзыв положительный.

4. Гайнуллин Иван Камилевич, доктор физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, отмечает в своем отзыве: «... работа представляет собой законченное научное исследование, в котором получен ряд важных новых результатов, представляющих также практическую ценность. Особенно следует выделить определение важных параметров технологического процесса, при которых на порядок повышается ключевая характеристика мемристоров – отношение сопротивлений в низкоомном и высокоомном состояниях». В отзыве есть следующие замечания: «1) Надписи на многих рисунках в автореферате приведены на английском языке. 2) В тексте автореферата не приведены численные оценки сопротивления в высокоомном и низкоомном состояниях. 3) Предложенный подход имитационного моделирования радиационной стойкости актуален только для мемристоров, или может быть применен к другим приборам на основе кремния?». При этом отмечается, что «В целом, выполненная диссертационная работа представляет собой законченное, апробированное исследование, в котором получены новые оригинальные данные, представляющие интерес с точки зрения развития электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники». Отзыв положительный.

5. Смирнов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехнической электроники и нанoeлектроники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения, ведущий научный

сотрудник Научно-исследовательской лаборатории «Нейроэлектроника и мемристивные наноматериалы» Южного федерального университета, отмечает в своем отзыве: «...диссертационная работа Окулич Е.В., направленная на улучшение воспроизводимости параметров мемристоров с помощью разработки методов управления распределением дефектов в диэлектрическом слое, а также способов создания концентраторов электрического поля с целью контролируемого управления точками (областями) зарождения филаментов и, соответственно, локализации процессов, ответственных за резистивное переключение, является актуальной. Работа Евгении Викторовны является законченной, комплексной и, несомненно, обладает научной новизной, теоретическим и прикладным значением, Одной из центральных проблем усовершенствования мемристивных схем является также повышение их радиационной стойкости». В отзыве имеются замечания: «в тексте автореферата не представлены латеральные параметры электродов при электрических измерениях, при этом в разделе 2.4 работы сказано, что область вблизи верхнего электрода является ключевой для формирования каскадов смещения, служащих концентраторами электрического поля, в тексте автореферата не представлены результаты исследований влияния ионно-лучевой модификации мемристивных структур на параметры энергонезависимости памяти (длительности хранения информации), что является одним из основных параметров мемристоров, как представлено во вводной части автореферата.». Также отмечено, что «...полученные автором научные результаты являются существенным вкладом в развитие перспективных элементов памяти на основе полупроводниковых оксидов.». Отзыв положительный.

6. Тельминов Олег Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела перспективных исследований АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», доцент базовой кафедры микро- и наноэлектроники МФТИ, в своем отзыве отмечает, что «Достоинством работы является глубокая проработка поставленных задач, обеспеченная достаточным количеством результатов моделирования и исследований с последующим обсуждением полученных результатов.». Отзыв содержит замечания: «(1) отсутствие математических формул и выражений в автореферате затрудняет точность

передачи научных результатов; (2) недостаточно полный анализ влияния изменения свойств материалов на весь перечень потребительских характеристик. Например, обратной стороной предложенного в работе облучения для улучшения части характеристик являются радиационные повреждения структуры, а примененное в пленке отклонение от стехиометрии – снижение долговечности. Такие изменения потенциально могут уменьшить одну из ключевых характеристик – время хранения состояния, но исследования по этому вопросу не проведены.». Отзыв положительный.

7. Юнин Павел Андреевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией диагностики радиационных дефектов в твердотельных наноструктурах Института физики микроструктур РАН – филиала федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» отмечает в своем отзыве, что «работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу, обладающую внутренним единством. Работа прошла значительную апробацию, ее выводы обоснованы и достоверны. Паспорту специальности 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» работа соответствует. Автореферат написан ясным физическим языком, отражает содержание диссертационной работы.». Отзыв не содержит замечаний, в нём задаётся вопрос: «практически всюду в диссертационной работе речь идет об исследовании мемристорных структур на основе тонких пленок субоксида кремния или стабилизированного иттрием диоксида циркония, однако в последней главе упоминаются также и структуры на основе диоксида гафния. Не совсем ясно, имеют ли мемристорные структуры со слоями HfO_2 какие-либо преимущества (в т.ч. в радиационной стойкости) по сравнению со структурами на основе SiO_x или $\text{ZrO}_2(\text{Y})$.». Отзыв положительный.

Все отзывы на автореферат диссертации положительные. В них отмечается актуальность темы исследования, новизна результатов, их научная и практическая значимость. Во всех отзывах делается вывод, что рассматриваемая диссертация соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а соискатель

Е.В. Окулич заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью в профессиональном сообществе результатов их научных исследований в области микро- и нанoeлектроники, а также близостью направлений их научных исследований к тематике диссертационной работы соискателя, связанной с исследованием ионно-лучевого и радиационного воздействия на мемристивные структуры.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), г. Санкт-Петербург – специализируется, в частности, на теоретическом и экспериментальном исследовании ионно-лучевого и радиационного воздействия на различные полупроводниковые и диэлектрические структуры, что соответствует тематике диссертации соискателя. Известными специалистами ведущей организации в указанных областях являются: доктор физико-математических наук, профессор Козловский Виталий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор Титов Андрей Иванович, доктор физико-математических наук Карасев Платон Александрович.

Официальный оппонент – доктор физико-математических наук, профессор Ситников Александр Викторович – является высококвалифицированным специалистом в области физики и технологии тонкопленочных диэлектрических и магнитных структур, автором статей в высокорейтинговых международных и отечественных периодических научных изданиях по физике и технологии мемристоров.

Официальный оппонент – кандидат физико-математических наук Хайбуллин Рустам Ильдусович – высококвалифицированный специалист в области физики ионно-лучевого воздействия на полупроводниковые и диэлектрические структуры, автор статей в высокорейтинговых научных журналах по исследованию

воздействия ионного облучения на свойства тонких диэлектрических пленок, включая формирование в них нанокластеров.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны:

- 1) новая методика улучшения рабочих параметров мемристоров на основе оксида кремния с использованием ионной имплантации;
- 2) новая методика моделирования эволюции мемристивной структуры на основе оксида кремния в зависимости от стехиометрии и параметров облучения;
- 3) новый ионно-лучевой способ имитационного моделирования радиационной стойкости полупроводниковых приборов к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами;

предложены:

- 1) модель и методика создания каскадов смещения, формирующихся в результате облучения тяжелыми ионами, как дополнительных концентраторов электрического поля на границе между электродом и рабочим слоем структуры диэлектрика;
- 2) модель контролируемого введения примесных атомов кремния в диэлектрик для создания равномерного (по толщине) распределения дефектов в нем;
- 3) способ расчета параметров облучения ионами средних энергий для имитации радиационной стойкости мемристоров к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами;

доказана перспективность использования:

- 1) ионного облучения для улучшения параметров мемристивных структур;
- 2) разработанного алгоритма компьютерного моделирования для изучения структурных изменений в проводящих путях мемристивных структур в результате ионного облучения;
- 3) облучения ионами средних энергий для имитации радиационной стойкости мемристивных устройств;

введены новые представления о влиянии радиационных треков, созданных ионами

низких и средних энергий, на параметры мемристоров.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения, вносящие вклад в расширение представлений о механизмах влияния радиационных дефектов на параметры мемристоров;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы:

технология ионного облучения полупроводниковых материалов; измерение вольт-амперных характеристик мемристивных структур до и после ионного облучения; исследования элементного состава пленок и характера химических связей входящих в состав пленок элементов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии; программа SRIM для расчетов распределения дефектов, ионизационных и упругих потерь; программа LAMMPS для молекулярно-динамического моделирования структурных изменений в филаменте;

изложены основы нового способа улучшения параметров оксидных мемристоров;

раскрыта возможность оптимизации рабочих характеристик мемристоров на основе расчетов параметров ионного облучения;

изучены: зависимость рабочих параметров мемристоров от вида облучающего иона, его энергии и дозы облучения; процессы структурной перестройки в зоне филамента при его разогреве.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан ионно-лучевой способ имитационного моделирования радиационной стойкости мемристивных устройств к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами;

определены параметры ионного облучения для улучшения характеристик мемристоров и методики имитационного моделирования их радиационной стойкости;

создана система практических рекомендаций по расчетам условий облучения мемристивных структур;

представлены рекомендации по дальнейшему использованию ионного облучения

для улучшения параметров мемристоров и их воспроизводимости, а также для физического моделирования радиационной стойкости мемристоров.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены с применением современного научного оборудования, соответствующего мировому уровню, их достоверность обусловлена использованием совокупности хорошо апробированных экспериментальных методов исследования, корректных теоретических представлений при анализе и интерпретации экспериментальных результатов;

теория, развитая на основе метода молекулярной динамики, согласуется с полученными экспериментальными данными, а также с теоретическими и экспериментальными данными по теме диссертации, опубликованными в рецензируемых научных изданиях;

идея уменьшения разброса характеристик мемристоров **базируется** на обобщении теоретических и экспериментальных фактов, полученных как соискателем, так и опубликованных ранее, в области физики мемристивных устройств и, в частности, на предположении о возможном влиянии ионного облучения на их рабочие параметры;

использованы современные представления о влиянии ионной имплантации на структуру диэлектрика; современные экспериментальные методы исследования и обработки результатов; современные методы поиска и обработки информации;

установлено соответствие разработанной модели имитации радиационной стойкости мемристоров результатам натурных испытаний.

Результаты и выводы по диссертации представляют интерес для организаций, работающих над получением мемристивных материалов и проведением исследований в области информационных и нейроморфных технологий: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" (г. Нижний Новгород), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников

им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск), Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (г. Казань), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (г. Москва), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (г. Москва), Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (г. Москва), Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород), филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» (г. Нижний Новгород) и ряде других научных центров.

Личный вклад соискателя состоит в формулировке цели и задач исследования, определяющем участии в получении и анализе основных экспериментальных результатов, разработке методик моделирования. Выбор и подготовка материалов образцов, а также планирование экспериментов проводились соискателем совместно с руководителем. Проведение экспериментов (отжиг образцов, снятие вольт-амперных характеристик) и обработка экспериментальных результатов проводились соискателем самостоятельно. Разработка методики моделирования методом молекулярной динамики проводилась соискателем совместно с коллегами. Проведение всех расчетов и обработка полученных данных осуществлялись соискателем самостоятельно. Разработка методики ионно-лучевой имитации радиационной стойкости мемристивных структур к протонному и нейтронному облучению проводилась соискателем совместно с коллегами, а расчеты и обработка экспериментальных данных

выполнялись соискателем самостоятельно.

В ходе защиты диссертации в рамках дискуссии членом диссертационного совета В.Н. Чувильдеевым были высказаны следующие критические замечания:

1. Идея управлять филаментами с помощью ионной имплантации – правильная. Но как она воплощается? Как интерпретируются результаты? С помощью ионного воздействия изменяется структура, мы стремимся управлять поведением филаментов, это означает, что должны быть построены какие-то графики, зависимости, рекомендации – чем облучать, и в каких количествах. Это сделано не было. С этой точки зрения первое положение, выносимое на защиту – это вопрос хорошо поставленный, но не решенный.

2. О радиационных повреждениях – из графика на странице 20 (соответствие расчетных данных экспериментальным значениям) следует, что воздействия не привели к изменению свойств. Является ли это доказательством эквивалентности воздействий – не понятно. Доказательство кажется не очень убедительным. Утверждение, что всё равно, чем облучать, ионами или нейтронами, кажется странным, ведь дело не только в энергии, а дело в структуре взаимодействия. Воплощение прекрасной в принципе идеи работы не достаточно, слишком много вопросов к результатам, которые объявлены доказанными.

Соискатель Окулич Е.В. ответила на заданные ей в ходе заседания вопросы, в ряде случаев приведя собственную аргументацию.

На заседании 25 декабря 2024 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи по исследованию ионно-лучевой модификации мемристоров на основе оксида кремния и стабилизированного иттрием диоксида циркония для улучшения и воспроизводимости их рабочих параметров и анализу структурных перестроек в филаменте при облучении ионами кремния (в оксиде кремния), а также за разработку и реализацию способа ионно-лучевой имитации стойкости мемристоров к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами, что имеет значение для разработки мемристивных структур и устройств на их основе и может внести вклад в модернизацию электронной компонентной базы микро- и наноэлектроники и квантовых устройств, присудить Окулич Е.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств), участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 (нет) человек, проголосовали: за – 13, против – 3, недействительных бюллетеней 0 (нет).

Председатель
диссертационного совета



Ученый секретарь
диссертационного совета



Чупрунов Евгений Владимирович

Марычев Михаил Олегович

Дата оформления Заключения 25.12.2024 г.