

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор
ФГАОУ ВО СПбПУ

В.В.Сергеев

2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО» (ФГАОУ ВО СПбПУ)

на диссертацию Окулич Евгении Викторовны
«Ионно-лучевая модификация параметров мемристоров на основе SiO_x и
 $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ и имитационное моделирование их радиационной стойкости»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база
микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Актуальность темы диссертационной работы

Явление обратимого изменения сопротивления при росте напряжённости электрического поля или смене его знака в тонких плёнках оксидов привлекло к себе внимание в 60-х годах 20 века. За прошедшее время был выполнен значительный объем как экспериментальных, так и теоретических исследований данного эффекта в плёнках разной природы (вплоть до органических), разработан ряд теоретических моделей происходящих процессов и предложены пути создания соответствующих электронных приборов - мемристоров. Возможность получения нескольких уровней сопротивления открывает перспективы изготовления чипов для нейроморфных вычислений. Ранее установлено, что изменение сопротивления происходит через формирование или разрушение проводящего филамента при переключении напряжения. Однако для широкого практического применения мемристоров необходимо преодолеть недостатки этих устройств, наиболее существенными из которых является низкие воспроизводимость параметров от прибора к прибору и их повторяемость от цикла к циклу переключения. Причинами тому являются флуктуации состава и дефектов в диэлектрической пленке, стохастическая природа процесса резистивного переключения, приводящая к разбросу сопротивлений как следствие образования различных конфигураций филамента

и т.д. Для решения указанных проблем необходимо увеличение объема знаний о структуре, морфологии и связанных с ними физических принципах работы мемристоров, особенно о процессах атомной перестройки в филаменте. В частности, необходима разработка методов управления областями зарождения филаментов и локализацией процессов их формирования. Очевидно, что эти процессы будут по-разному проходить в различных материалах. В диссертации рассматриваются два из всего возможного спектра материалов – оксид кремния и стабилизированный иттрием диоксид циркония. Каждый из них обладает собственными особенностями и преимуществами для дальнейшего технологического использования.

Ионно-пучковые методы уже более полувека занимают центральное место в индустрии полупроводниковых приборов и интегральных схем. Ионная имплантация позволяет легировать материалы атомами примесей, в том числе, с целью создания зародышей нанокластеров. Дефекты, возникающие при облучении твердых тел ускоренными ионами, также могут быть использованы для направленной модификации свойств мишени. Таким образом возможно управлять и зарождением филаментов. Однако способы и пути применения ионной имплантации для улучшения параметров мемристоров и повышения их воспроизводимости до сих пор слабо изучены. Дополнительная возможность, предоставляемая ионными пучками – это изучение деградации свойств электронных приборов при . Таким образом, **актуальность темы диссертации** не вызывает сомнения.

Научная новизна и значимость результатов диссертации.

В диссертации впервые экспериментально установлено, что улучшение значений рабочих параметров мемристора и снижение их разброса может быть достигнуто при помощи ионного облучения. Показано, что каскады смещений, формирующиеся в приповерхностном слое диэлектрика, из которого изготовлен прибор, формируют возмущения структуры, приводящие к довольно стабильному формированию филаментов в ходе рабочих переключений.

Выполнен большой объем работы по моделированию процессов ионно-лучевой модификации исследуемых оксидов и их отжига и получены ранее неизвестные данные об 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.

Полученные результаты имеют важное **практическое** значение, поскольку они могут быть использованы при разработке новых полупроводниковых приборов и совершенствовании ионно-пучковых технологий. Весьма полезны для практических задач разработанные автором алгоритмы и программы расчетов, которые могут применяться для нахождения оптимальных режимов в инженерии дефектов, основанной на использовании ионных пучков.

В целом диссертация выполнена на высоком научном уровне и свидетельствует о высокой квалификации автора как ученого. Вместе с тем,

необходимо сделать несколько замечаний.

1. Почему автор называет разупорядоченные области, формируемые тормозящимися ионами, концентраторами электрического поля? Заранее нельзя сказать, что проводимость этих областей будет существенно выше, чем у окружающей оксидной матрицы.
2. Автор называет оптимальной такую дозу ионов, при которой, в случае однородного распределения падающих ионов на поверхность мишени, последняя окажется равномерно покрыта с небольшими расстояниями между каскадами, и указывает, что в случае облучения ионами Хе с энергией 5 кэВ эта доза равна $9 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Однако на практике невозможно ожидать подобной равномерности. При облучении до указанной дозы неизбежно появятся области перекрытия двух и более каскадов. В то же время из таблиц 1, 2а и 2б на с. 57 и рис. 25 следует, что с увеличением дозы ионов Хе до $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ происходит улучшение параметров мемристорных структур. Может ли именно перекрытие играть существенную роль? Для прояснения этого вопроса необходимо провести исследование при более высоких дозах.
3. Облучение ионами Хе с энергией 5 кэВ привело к улучшению стабильности напряжений переключения мемристорных структур. Как оно скажется на максимальном количестве возможных циклов переключения приборов до отказа? Этот важный с практической точки зрения результат не получил достаточного внимания в работе.
4. При облучении ионами Si была использована довольно высокая доза ($8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$), при которой может проявляться распыление мишени. Учитывалось ли это обстоятельство?
5. Параметры модели, использованные при проведении расчетов методом молекулярной динамики, указаны чрезвычайно скупое, в частности, не указаны граничные условия. Каков радиус обрезания использованного потенциала? Не приведено ни одного изображения получаемых кластеров, что сильно украсило бы работу.
6. Была ли выполнена экспериментальная проверка полученного в результате моделирования эффекта появления в оксиде кремния кластеров Si_n? Например, на спектрах РФЭС должны появляться линии, соответствующие «металлическому» кремнию.

Однако, отмеченные недостатки не снижают общего высокого мнения о представленной диссертации.

Материалы диссертации опубликованы в ведущих зарубежных (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Materials Letters) и российских (Письма в ЖТФ, Вестн. Моск. ун-та) специализированных научных журналах, в главах в коллективных монографиях, доложены на тематических всероссийских и международных научных конференциях. Всего по теме диссертации в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, опубликовано 7 статей.

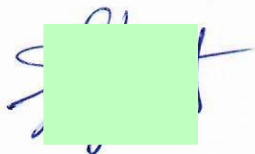
Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание.

Таким образом, 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 нанoeлектроники, квантовых устройств.**

Доклад Е.В. Окулич по материалам диссертационной работы и отзыв ФГАОУ ВО СПбПУ по данной диссертации заслушаны и обсуждены на расширенном заседании высшей инженерно-физической школы института электроники и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого» 19 ноября 2024 г. (протокол № 29). На заседании присутствовало 25 сотрудников, в том числе 7 докторов и 10 кандидатов физико-математических наук – специалистов по теме диссертационного исследования.

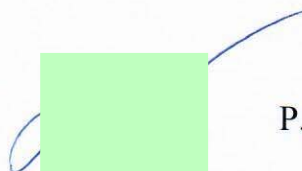
Отзыв подготовил



КАРАСЕВ Платон Александрович
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор высшей инженерно-физической школы
института электроники и телекоммуникаций
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский Политехнический университет
Петра Великого»
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Тел. +7 (812) 552-75-16;
e-mail: platon.karasev@spbstu.ru

Подпись	<i>Карасев П.А.</i>
УДОСТОВЕРЯЮ	
Ведущий специалист	
по кадрам	<i>Воскресенская</i>
«02» 12	20 24 г.

и.о. директора
высшей инженерно-физической школы
к. ф.-м. н., доцент



Р.Г.Бурковский

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский Политехнический университет
Петра Великого»
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
e-mail: office@spbstu.ru, тел. +7 (812) 775-05-30