

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

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

Актуальность темы

Создание и исследование мемристивных структур, с учётом их потенциала использования в нейроморфных вычислениях и энергонезависимой памяти, представляет собой важную научно-практическую задачу современной науки. За последние 15 лет этой теме было посвящено множество научных публикаций. Однако, проблема разброса параметров резистивного переключения в мемристорах, таких как напряжение переключения и значения сопротивления в двух различных (высокорезистивном и низкорезистивном) состояниях, существенно ограничивает возможность практического применения мемристоров и требует глубокого понимания физических процессов, происходящих в этих устройствах.

Ионная имплантация, как эффективный метод создания дефектов, является весьма перспективной для модификации параметров мемристоров, благодаря своей совместимости с существующими технологиями полупроводниковой микроэлектроники. С другой стороны, использование при создании мемристоров таких диэлектриков, как оксида кремния (SiO_2) и стабилизированного иттрием диоксида циркония ($\text{ZrO}_2(\text{Y})$), открывает новые возможности для улучшения характеристик мемристоров. Возможность управления и контроля концентрацией дефектов путем ионного облучения этих оксидных материалов действительно является весомым преимуществом. Исследования, посвященные ионно-лучевой модификации свойств мемристоров, способствуют дальнейшему развитию данной области, особенно в контексте их радиационной стойкости, что крайне важно для применения в космических и реакторных условиях. Моделирование методом молекулярной динамики позволяет глубже понять процессы, происходящие на уровне атомов, в то же время как разработка новых методик имитационного испытания мемристоров на стойкость к излучению будет способствовать созданию более устойчивых к радиационному воздействию

устройств. Поэтому **актуальность диссертационной работы** Е.В. Окулич, посвященной исследованию ионно-лучевой модификации параметров мемристоров на основе SiO_x и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ и имитационному моделированию их радиационной стойкости, **не вызывает сомнений**.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из Введения, 4-х глав, Заключения и Приложения. Объем диссертации составляет 154 страницы, включая 82 рисунка, 9 таблиц, список сокращений, список публикаций автора по теме диссертации, список цитируемой литературы, содержащий 141 наименований.

Во Введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, положения, выносимые на защиту. Здесь же описана методология и методы исследования и выделен личный вклад автора.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертационной работы, в котором описаны экспериментальные исследования и модельные представления о процессах резистивного переключения в мемристорах.

Вторая глава является оригинальной и посвящена изложению и анализу экспериментальных результатов по ионно-лучевой модификации мемристивных структур на основе тонких пленок SiO_2 и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$. Рассматриваются различные режимы облучения мемристивных структур ионами легких (He), средних (Ne, Si) и тяжелых (Xe) элементов с задачей улучшения их рабочих характеристик двумя способами: либо путем формирования концентраторов электрического поля на границе между электродами и рабочим оксидным слоем за счет создания непересекающихся каскадов смещения, либо путем введения примесных атомов кремния и/или дефектов, контролируя при этом их пространственное распределение. Представлены вольтамперные характеристики и зависимости сопротивления в высокорезистивном и низкорезистивном состояниях от количества циклов резистивного переключения для контрольных и облученных мемристивных структур. Показано, что облучение SiO_2 ионами инертного газа Xe^+ с энергией 5 кэВ снижает разброс параметров мемристоров и увеличивает отношение сопротивлений в обоих состояниях. Также установлено, что облучение пленок оксида кремния или стабилизированного иттрием диоксида циркония ионами Si^+ с энергией 20 кэВ и 6 кэВ, соответственно, значительно

улучшает характеристики мемристивных структур, созданных на их основе. Приведено физическое обоснование наблюдаемых эффектов.

В третьей оригинальной главе представлены методика и результаты моделирования структурной перестройки мемристивных устройств на основе нестехиометрического SiO_x в локальной области проводящего филамента методом молекулярной динамики. Показано, что структура филамента за счет нагрева до 1500 К, например, во время протекания тока через мемристор, претерпевает значительные изменения, связанные с образованием или распадом нанокластеров кремния и других соединений. Результаты моделирования также демонстрируют сложные процессы перестройки структуры филамента во время переключения между проводящим и непроводящим состояниями на временном масштабе от единиц до десятков наносекунд. Во время переключений удаление атомов кислорода из области филамента ведет к образованию кремниевых кластеров, в то время как обратная миграция кислорода способствует их частичному растворению. Компьютерное моделирование подтверждает выводы главы 2 о возможности управления параметрами мемристоров с помощью ионной имплантации примесных атомов кремния.

В четвертой оригинальной главе приведены теоретическое обоснование методики и алгоритмы выбора параметров ионного облучения для имитационного испытания стойкости мемристоров к высокоэнергетическому облучению протонами или нейтронами. Представлены результаты имитационных испытаний тонкопленочных мемристивных структур на основе SiO_2 , HfO_2 , ZrO_2 , на основе анализа которых сделаны выводы о высокой радиационной стойкости рабочих характеристик мемристоров. Показано, что облучение мемристоров на базе тонких пленок SiO_2 ионами H^+ , Si^+ , O^+ средних энергий (150 кэВ) имитирует радиационную стойкость мемристоров по отношению к облучению космическими протонами с энергией 10 МэВ и реакторными нейтронами с энергией 1 МэВ с эквивалентным уровнем ионизирующего и дефектообразующего воздействия.

В Заключении приведены основные выводы и результаты диссертационной работы.

В диссертационной работе получен ряд новых результатов, среди которых наиболее важными являются следующие:

1. Установлено и с физической точки зрения обосновано сильное влияние пространственно-разделенных каскадов смещения на мемристивные свойства и характеристики оксидных пленок SiO_2 и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$, подвергнутых ионному облучению. В частности, показано, что облучение мемристивных структур на основе SiO_2 ионами Xe^+ с энергией 5 кэВ с теоретически предсказанной дозой облучения позволяет не только снизить разброс рабочих параметров мемристора, но и существенно повысить отношение сопротивлений в высокорезистивном и низкорезистивном состояниях.
2. Экспериментально показано и теоретически обосновано то, что ионная имплантация примеси кремния в пленки оксида кремния или стабилизированного иттрием диоксида циркония приводит к значительному улучшению параметров мемристоров, созданных на базе этих пленок, за счет кластеризации примеси кремния и формирования дополнительных каналов протекания тока в облученной оксидной пленке.
3. Результаты исследования процессов структурной перестройки мемристора на основе диоксида кремния в области филамента при повышенной температуре 1500 К методом молекулярно-динамического моделирования. Моделирование позволило выявить разнообразие перестроек атомной структуры мемристора, формирование нанокластеров кремния и других различных комплексов в области проводящей нити на временном масштабе менее 100 нс, а также установить зависимость этих процессов от стехиометрического состава оксида, химического типа, энергии ионов и дозы облучения.
4. Разработка и апробация метода ионно-лучевой имитации радиационной стойкости мемристоров к ионизирующему или дефектообразующему облучению космическими протонами или реакторными нейтронами.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые было исследовано и теоретически обосновано влияние процессов дефектообразования и структурной перестройки проводящих филаментов на рабочие характеристики мемристивных структурах на основе оксида кремния и циркония, подвергнутых облучению ионами различных химических элементов. Также метод ионно-

лучевого имитационного моделирования был впервые использован для оценки радиационной стойкости мемристоров к воздействию космических протонов и реакторных нейтронов.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов определяются использованием современного научного оборудования, согласованностью результатов измерений, выполнением тестовых измерений, выполнением моделирования, хорошо согласующегося с экспериментальными данными, а также сопоставлением и согласием полученных результатов с известными из литературы данными.

Научная и практическая значимость работы заключается в получение новых фундаментальных знаний в области дефектообразования в тонкоплёночных мемристивных структурах на основе оксидов, подвергнутых ионному облучению. Полученные в работе результаты могут быть использованы для повышения эффективности и надежности работы мемристоров на базе оксида кремния, а также стабилизированного иттрием диоксида циркония, обеспечивая более высокую степень их воспроизводимости и стабильности работы в различных условиях эксплуатации. Разработанные в работе методологические подходы и результаты физического моделирования радиационной стойкости исследуемых мемристорных структур позволяют значительно сократить временные и ресурсные затраты на определение их радиационной стойкости по сравнению с традиционными натурными испытаниями.

Замечания и недостатки по содержанию диссертации

1. Глава 1. Слишком сжатый литературный обзор. Подробно освещена тема оксида кремния, но практически ничего не сказано про диоксид циркония.
2. Не представлены результаты исследования мемристорных структур на основе диоксида циркония, облученных тяжелыми ионами Хе, в главе 2. Почему?
3. Из текста работы не ясно почему для оксида кремния напряжение считывания (V_{READ}) равнялось +0,5 В, а для диоксида циркония минус 0,5 В (глава 2)?
4. Глава 3. При моделировании структурной перестройки нестехиометрического оксида кремния в области филамента (глава 3) была выбрана только температура 1500 К. Представляют интерес результаты моделирования перестройки филамента и при других, более низких температурах.

5. В подразделе 3.2.2 указан только объем моделируемой структуры, но не указано количество атомов в ней.
6. Не обоснован выбор потенциала в разделе 3.2.5 и, здесь же, что такое *«характерные значения длительностей прикладываемых к мемристору импульсов напряжения»*? Не указаны численные значения этих характерных длительностей.
7. Глава 4. Не представлены экспериментальные условия проведения измерений, результаты которых показаны на рисунках 78, 79, 80 и 81.

Вышеупомянутые замечания не умаляют научную значимость и достоинства диссертационной работы Окулич Е.В., в которой **решена важная научно-практическая задача** – детально исследовано влияния ионного облучения на процессы дефектообразования, рабочие характеристики и радиационную стойкость мемристивных наноструктур на основе оксида кремния и стабилизированного иттрием диоксида циркония.

Полученные результаты представляют большой научный и практический интерес и могут быть рекомендованы к использованию в Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск), Казанском физико-техническом институте ФИЦ КазНЦ РАН (г. Казань), Московском физико-техническом институте (г. Москва), МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), НИЦ Курчатовский институт (г. Москва), Институте физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова (г. Нижний Новгород) и ряде других научных центров, занимающихся разработкой мемристивных материалов и проведением исследований в области информационных и нейроморфных технологий.

Основные результаты диссертации опубликованы в семи научных статьях в высокорейтинговых международных и российских научных журналах, входящих в перечень ВАК, а также докладывались на ряде российских и международных конференций.

Автореферат диссертации полностью отражает её основное содержание.

По своему содержанию, объему, новизне, достоверности, научной и практической значимости полученных результатов, диссертационная работа «Ионно-лучевая модификация параметров мемристоров на основе SiO_x и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ и имитационное моделирование их радиационной стойкости» удовлетворяет требованиям п. 9 "Положения о порядке присуждения степеней", утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, а ее автор, Окулич Евгения Викторовна, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент,

кандидат физико-математических наук, (1.3.3 – Теоретическая физика)
старший научный сотрудник лаборатории радиационной
физики Казанского физико-технического института им. Е.К.
Завойского – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский
научный центр Российской академии наук»

Хайбуллин Рустам Ильдусович


06.12.2024

Адрес: КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН,

420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7.

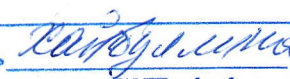
Тел.: 8-(843) -231-91- 09, e-mail: rik@kfti.knc.ru

Я, **Хайбуллин Рустам Ильдусович**, даю своё согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.2.340.01, и их дальнейшую обработку.




06.12.2024



Подпись 
Зав. канцелярией КФТИ - обособленное
структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН

Куркина Н.Г.

06.12.2024