

На правах рукописи



Окулич Евгения Викторовна

Ионно-лучевая модификация параметров мемристоров на основе SiO_x и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ и имитационное моделирование их радиационной стойкости

*Специальность 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники,
квантовых устройств*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ им. Н.И. Лобачевского)

Научный руководитель:

Тетельбаум Давид Исаакович

доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии тонких пленок Научно-исследовательского физико-технического института ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Официальные оппоненты:

Ситников Александр Викторович

доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», профессор кафедры твердотельной электроники

Хайбуллин Рустам Ильдусович

кандидат физико-математических наук, 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», старший научный сотрудник лаборатории радиационной физики

Ведущая организация:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится « 25 » декабря 2024 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.340.01 в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3, ауд. 227 (Конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/1493>

Автореферат разослан « » ноября 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.340.01,
кандидат физико-математических наук



Марычев Михаил Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений в области информационных и нейроморфных технологий является создание и изучение элементов энергонезависимой памяти на основе эффекта резистивного переключения (РП) – мемристоров. Их принцип действия основан на переключении между двумя устойчивыми состояниями сопротивления – состоянием с высоким сопротивлением (СВС) и состоянием с низким сопротивлением (СНС) – путем приложения к электродам мемристора напряжения определенной полярности и величины. Мемристор можно определить как пассивный элемент электрической цепи, сопротивление которого зависит от прошедшего через него заряда. После снятия воздействия электрического поля мемристор не изменяет своего резистивного состояния, т.е. “запоминает” последнее значение сопротивления. Отсюда и его название (англ.: memristor – сокращение от memory и resistor – резистор с памятью). Геометрически мемристор представляет собой структуру «металл-диэлектрик-металл» или «металл-диэлектрик-полупроводник», в которой между слоями хорошо проводящего материала (электродами) находится тонкая (обычно менее 100 нм) пленка диэлектрика. Мемристоры считаются совместимыми с традиционными процессами изготовления комплементарных структур «металл-оксид-полупроводник» (КМОП).

Ток в этих структурах протекает по тонким проводящим каналам – филаментам. В широко распространенном типе мемристоров – NVM – *Non-volatile memory*, филаменты сформированы кислородными вакансиями, а процессы переключения происходят за счет процесса миграции ионов кислорода (кислородных вакансий), процессов окисления и восстановления.

За последние 10-15 лет исследованиям в этой области посвящено значительное количество публикаций. Однако для широкого практического применения мемристоров требуется решение проблем, обусловленных рядом недостатков этих устройств. Среди них центральное место занимает низкая воспроизводимость параметров, связанная со стохастической природой процесса РП. На каждом цикле переключения возникает статистический разброс резистивных состояний вследствие образования новой конфигурации филамента, который формируется или разрушается при различных значениях тока и напряжения. Это в большей степени связано с тем, что зарождение филаментов происходит на неоднородностях, располагающихся на границе раздела «диэлектрик/электрод», а также с наличием флуктуаций концентрации состава и дефектов в пленке и др. Эти же обстоятельства дают значительный вклад в разброс параметров РП от устройства к устройству.

Разброс параметров РП (напряжения переключения и значения сопротивлений в состояниях СВС и СНС) является весьма критичным с точки зрения возможности промышленной реализации электронных (в том числе нейроморфных) схем на основе

мемристоров. Решение этих проблем требует углубленных фундаментальных знаний о структуре, морфологии и связанных с ними физических принципах работы мемристоров, особенно, о процессах атомной перестройки в филаменте.

Магистральным путем улучшения воспроизводимости параметров является разработка методов управления распределением дефектов в диэлектрике, а также способов создания концентраторов электрического поля с целью контролируемого управления точками (областями) зарождения филаментов и, соответственно, локализации процессов, ответственных за РП.

Как хорошо известно, наиболее эффективным и гибким путем контролируемого создания дефектов в твердых телах является ионная имплантация, которая позволяет регулировать распределение дефектов путем рационального выбора параметров таких как вид ионов, их энергия, доза, режим постимплантационного отжига. Ионная имплантация позволяет также проводить не ограниченное «химией» легирование материалов заданными примесями с целью создания зародышей нанокластеров и комплексов, играющих, как выяснилось, ключевую роль в процессах, происходящих в филаментах и ответственных за РП. Большим преимуществом данного метода является также совместимость с традиционной технологией полупроводниковой микроэлектроники, что особенно важно для масштабирования и удешевления производства мемристоров как новой элементной базы информационных и нейроморфных устройств.

Однако физические основы применения ионной имплантации для улучшения параметров мемристоров и повышения их воспроизводимости путем контролируемого создания дефектов в области филамента, а также мест зарождения филаментов, к началу выполнения диссертации оставались слабо разработанными. Поэтому экспериментальное и теоретическое исследование процессов, связанных с дефектообразованием в филаментах и их контролируемым зарождением при ионном облучении, является весьма актуальной задачей.

Одной из центральных проблем усовершенствования мемристивных схем является также повышение их радиационной стойкости. Это связано с перспективой применения мемристоров в космической и ядерной отраслях, например, в целях дистанционного управления установками на атомных электростанциях. Натурные испытания радиационной стойкости весьма затратны, и при этом не всегда доступны или недостаточно оперативны. Поэтому в последнее время натурные испытания заменяют так называемым имитационным моделированием. В данной работе впервые представлен разработанный и продемонстрированный диссертантом способ ионно-лучевой имитации радиационной стойкости мемристоров.

Наиболее распространенными материалами, используемыми в качестве диэлектрика в мемристивных структурах, являются TaO_x , ZrO_x , HfO_x , TiO_x и др., а также SiO_x и SiN_x . Среди них как наиболее совместимый с традиционной кремниевой технологией признан оксид кремния. Отметим, что он имеет широкое применение в КМОП-технологии

производства кремниевых транзисторов, являющихся частью функциональных мемристорных схем. Отсюда следует актуальность выбора в качестве предмета настоящего исследования мемристоров на базе оксида кремния. Выбор другого материала – стабилизированного иттрием диоксида циркония ($\text{ZrO}_2(\text{Y})$, СДЦ), обусловлен рядом существенных преимуществ, среди которых самым важным является возможность путем регулирования концентрации иттрия получать оптимальную концентрацию вакансий, играющих ключевую роль в функционировании NVM мемристоров.

К началу выполнения диссертационного исследования были реализованы попытки создания мемристивных устройств на основе пленок аморфного оксида кремния, основанные на теоретических и экспериментальных работах, в которых обнаружены и изучены мемристивные эффекты. Однако физические процессы, лежащие в основе ионно-лучевой модификации параметров мемристоров, оставались слабо изученными. Кроме того, не было разработанной методики ионно-лучевого имитационного испытания мемристоров на стойкость к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами, хотя такой способ испытания, как установлено в работе, является полезным и эффективным.

Цели и задачи диссертационного исследования

Целью диссертационной работы является экспериментальное и теоретическое (компьютерное) исследование физических процессов в пленках оксида кремния и стабилизированного иттрием диоксида циркония, а также в мемристорных структурах на базе этих пленок, для улучшения и воспроизводимости рабочих параметров мемристоров; разработка и реализация ионно-лучевого метода испытаний стойкости мемристоров к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

1. Расчет оптимальных условий облучения поверхности пленок SiO_2 ионами Xe^+ для улучшения и воспроизводимости рабочих параметров мемристоров, создаваемых на основе SiO_2 .
2. Экспериментальное исследование влияния указанного облучения на вольт-амперные характеристики (ВАХ) и воспроизводимость параметров таких мемристоров при циклическом повторении операции переключения.
3. Исследование влияния облучения пленок SiO_2 и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ ионами Si^+ на рабочие параметры мемристоров, созданных на базе этих пленок, и их воспроизводимость.
4. Моделирование методом молекулярной динамики формирования дефектных комплексов в филаментах при облучении пленок SiO_2 и SiO_x ($x < 2$) ионами Si^+ и Xe^+ , а также в отсутствие облучения.
5. Разработка и реализация способа ионно-лучевой имитации радиационной стойкости мемристоров, созданных на базе пленок SiO_2 и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$, и изучение влияния различных доз ионного облучения на их параметры.

Научная новизна

1. Впервые установлено и интерпретировано с физической точки зрения явление, состоящее в том, что каскады смещения, формирующиеся на поверхности пленок диэлектрика, на основе которых изготовлен мемристор, приводят к улучшению его рабочих параметров и снижению их разбросов.

2. Впервые методом молекулярной динамики установлено, что легирование пленок SiO_2 и SiO_x ($x < 2$) кремнием путём ионного облучения с последующим отжигом при 1500 К приводит к формированию комплексов типа Si-Si_n , O-Si_n , Si-O_n , O-O_n , причем это происходит за времена, меньшие 100 нс. В пленках SiO_x ($x < 2$), не подвергнутых облучению, этот эффект также имеет место при наличии высокой концентрации кислородных вакансий, соответствующей стехиометрии.

3. Ионно-лучевой способ имитационного моделирования радиационной стойкости полупроводниковых приборов к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами впервые обоснован и применен для мемристоров на основе пленок SiO_2 и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$.

Теоретическая и практическая значимость

1. Полученные результаты расширяют фундаментальные знания о процессах ионно-лучевого формирования дефектных комплексов при ионном облучении оксидов кремния и их влиянии на параметры создаваемых на их основе мемристоров.

2. Результаты работы могут использоваться для улучшения параметров мемристоров на основе оксида кремния и стабилизированного иттрием диоксида циркония и их воспроизводимости.

3. Примененный и обоснованный в работе метод физического моделирования радиационной стойкости мемристивных структур позволяет существенно сократить сроки и трудоемкость работ по ее определению по сравнению с натурными испытаниями.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационного исследования является совокупность как хорошо отработанных методов исследования характеристик мемристоров, так и апробированных программных комплексов для расчетов.

В качестве метода управления свойствами материалов и мемристоров на их основе использовалась ионная имплантация, а в качестве теоретического метода исследования происходящих при этом процессов использовалась молекулярная динамика. При проведении экспериментальной части работы проводились измерения вольт-амперных характеристик мемристивных структур до и после ионного облучения, используемого для модификации свойств мемристора и для имитации их радиационной стойкости, а также применялся метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для исследования элементного состава пленок и характера химических связей входящих в состав пленок

элементов. При проведении *теоретических* расчетов использовались программы SRIM (для расчетов ионизационных и упругих потерь при имитации радиационной стойкости) и LAMMPS (для молекулярно-динамического моделирования структурных изменений в филаменте).

Положения, выносимые на защиту

1. Образование пространственно разделенных каскадов смещения в приповерхностной области пленок оксида кремния при облучении тяжелыми ионами приводит к увеличению на порядок отношения сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях мемристоров, созданных на базе этих пленок, и уменьшению до двух раз разброса напряжений формовки мемристоров, что обусловлено преимущественной локализацией мест зарождения филаментов на каскадах смещения.

2. Облучение пленок $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ ионами Si^+ приводит к увеличению на порядок отношения сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях мемристоров, созданных на базе этих пленок, и уменьшению до двух раз разброса значений этого отношения.

3. При облучении пленок оксида кремния ионами Si^+ происходит формирование комплексов Si-Si_n ($n \leq 14$), количество которых в процессе последующего отжига при температуре 1500 К проявляет тенденцию к стабилизации за время, меньшее 100 нс.

4. Облучение мемристоров на базе 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.

Степень достоверности

Достоверность исследований обеспечивается использованием современных теоретических методов компьютерного моделирования, современного аналитического и измерительного оборудования, анализом и статистической обработкой результатов измерений.

Результаты работы целесообразно использовать при разработке технологии создания мемристивных устройств памяти на основе диоксида кремния и других металл-оксидных структур.

Апробация

По теме диссертации опубликовано 42 печатных работы, правовую охрану получил 1 результат интеллектуальной деятельности. Из них **7 статей** [A1 – A7] в рецензируемых периодических изданиях, индексируемых в Scopus и рекомендованных ВАК РФ, **3 главы в коллективных монографиях** [A8 – A10], **2 учебно-методических пособия** [A11 – A12], **1**

свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [A13], 30 тезисов докладов [A14 – A43].

Результаты диссертационной работы были представлены на **23 научных конференциях**. Три доклада на конференциях были отмечены дипломами.

Работа по теме диссертации выполнялась в рамках 6 научно-исследовательских проектов, в одном из них в качестве руководителя (Грант РФФИ № 18-37-00456 «Ионно-лучевая модификация мемристивных наноструктур на основе оксидов кремния и циркония», 2018–2019 гг.).

Личный вклад автора в получение результатов

Личный вклад автора в проведенные исследования заключается: в проведении расчета (по разработанной коллегами методике) ионизационных и упругих потерь и параметров облучения при имитации радиационной стойкости мемристоров к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами [A1, A2]; в снятии ВАХ мемристивных устройств на основе диоксида циркония, подвергнутых облучению ионами кремния [A3]; 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 [A4, A5, A6]; в разработке методики молекулярно-динамического расчета совместно с коллегами, моделировании процесса, создании программ и обработке данных при облучении оксида кремния ионами кремния [A7].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, 4 глав, Заключения и Приложения. Объем диссертации составляет 154 страницы, включая 82 рисунка, 9 таблиц, список сокращений и условных обозначений, список публикаций автора по теме диссертации, список литературы, содержащий 141 наименование, Приложение на двух страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования; сформулированы цель и задачи диссертационной работы; указаны научная новизна и практическая значимость проводимых исследований; описаны методология и методы исследования; сформулированы положения, выносимые на защиту; указаны степень достоверности и апробация результатов; отмечен личный вклад автора.

Глава 1 содержит аналитический обзор литературных данных по теме исследования, касающихся экспериментальных исследований и модельных представлений о процессах резистивного переключения.

Показана «генетическая» связь явления резистивного переключения в мемристорах на основе оксида кремния с явлениями пробоя в МОП-транзисторах. Описаны предложенные в литературе механизмы резистивного переключения в мемристорах класса VCM (основанные на механизме изменения валентности), реализующиеся в оксидах металлов и в оксиде кремния. Освещено развитие моделей до настоящего времени. Представлены литературные данные по изучению возможности применения ионного облучения для управления характеристиками структур VCM типа. Дан обзор работ по исследованию стойкости мемристоров к высокоэнергетическому (космическому и реакторному) воздействию.

Заключительная часть главы 1 содержит обзор литературы по результатам молекулярно-динамического моделирования процессов резистивного переключения в мемристорах. Отмечен факт сравнительно малого числа таких работ и слишком малые времена слежения за процессами структурной перестройки. Сформулированы выводы из обзора, из которых естественным образом следуют цель и задачи диссертации.

Глава 2 посвящена изложению и анализу оригинальных экспериментальных результатов по ионно-лучевой модификации рабочих параметров мемристорных структур на основе оксидов SiO_2 и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$.

В **разделе 2.1** (Введение) изложены мотивация и постановка задачи данного исследования. Отмечено, что до настоящего времени основными недостатками мемристорных структур являются низкая воспроизводимость их рабочих характеристик: напряжения переключения между состояниями с низким и высоким сопротивлением (СНС и СВС соответственно), величины токов в этих состояниях, формы гистерезиса ВАХ. Наиболее вероятной причиной такого поведения является стохастическая природа зарождения филаментов в момент электроформовки, связанная, прежде всего, со случайным характером распределения плотности и пространственной локализацией мест зарождения филаментов. Ими могут быть обусловленные шероховатостью поверхности металлических контактов выступы и углубления, а также случайные вариации химического состава и дефектов в объёме плёнки или её загрязнений.

Для решения данной проблемы в работе предложено использовать два варианта облучения плёнок оксидов ионами средних энергий с целями: 1) формирования контролируемых дополнительных концентраторов электрического поля на границе между электродами и рабочим слоем (диэлектриком) структуры; 2) введения примесных атомов и/или дефектов в диэлектрик, контролируя их распределение (в трех измерениях) путем выбора вида ионов, их энергии и дозы. Приведено физическое обоснование предлагаемых вариантов и путей их практической реализации, включающих, в частности, необходимость проведения теоретических расчетов для получения требуемых результатов. Обоснован выбор оксида кремния и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ в качестве объектов исследования.

В разделе 2.2 описана методика исследования, включающая в себя изготовление образцов, алгоритм измерения ВАХ и перечисление вариантов экспериментов, проведенных в данной главе.

На начальном этапе было исследовано влияние облучения лёгкими ионами H^+ и Ne^+ с энергией 150 кэВ при последовательном наборе доз на работоспособность готовых мемристорных структур (раздел 2.3). Выбор ионов H^+ позволил оценить роль ионизационных потерь, выбор ионов Ne^+ – роль упругих потерь энергии при условии отсутствия химического влияния внедряемых ионов. Были выполнены расчёты распределения дефектов (с использованием программы SRIM) для двух видов структур $Au(40\text{ нм})/SiO_2(40\text{ нм})/TiN(25\text{ нм})/Ti(25\text{ нм})$ и $Au(40\text{ нм})/Ta(40\text{ нм})/ZrO_2(Y)(20\text{ нм})/Pt(40\text{ нм})/Ti(10\text{ нм})$.

Результаты расчетов показали, что для исследуемых структур удастся получить достигнутую степень однородности преобладающих видов энергетических потерь по глубине оксидного слоя. Экспериментальные исследования токов в СНС и СВС в зависимости от дозы и количества циклов переключения для мемристоров на базе SiO_2 продемонстрировало сохранение работоспособности и отсутствие значительных изменений параметров в исследуемом интервале, а наблюдаемые случайные выбросы исчезали уже после следующего очередного цикла переключения. ВАХ $ZrO_2(Y)$ демонстрируют отсутствие или слабое изменение при облучении ионами H^+ и деградацию при большой дозе облучения Ne^+ . В целом оба вида структур оказались пригодными для дальнейших экспериментов по изучению влияния ионного облучения на параметры мемристоров и их воспроизводимости.

В разделе 2.4 решена задача о выборе параметров облучения ионами He^+ , обеспечивающих пространственную локализацию концентраторов электрического поля (вариант 1) в пленках SiO_2 – структура $Au(40\text{ нм})/SiO_2(40\text{ нм})/TiN(25\text{ нм})/Ti(25\text{ нм})$: энергия 5 кэВ, интервал доз $10^{11} - 10^{13}\text{ см}^{-2}$.

На рисунке 1 представлены результаты измерения ВАХ мемристивных устройств на основе SiO_2 . Получено увеличение на порядок отношения токов в высоком ($R_{СВС}$) и низком ($R_{СНС}$) состояниях ($R_{СВС}/R_{СНС}$), измеренных при напряжении считывания. Переключение из СНС в СВС вызвано разрывом филаментов из-за окисления [1, 2]. Предпочтительным местом разрыва филамента является область вблизи верхнего электрода [1]. Из-за относительно малого размера каскада поперечное сечение области разрыва для облученных структур меньше по сравнению с необлученными. Это способствует более полному окислению филамента, что приводит к более высокому сопротивлению в СВС и соответствующему увеличению отношения $R_{СВС}/R_{СНС}$, тем, что при облучении тяжелым ионом зарождение филаментов происходит преимущественно не на случайных неоднородностях рельефа поверхности, а на каскадах смещения, служащих концентраторами электрического поля. Обработка экспериментальных данных показала уменьшение до двух раз разброса напряжений формовки мемристоров, что также связано с

локализацией мест зарождения филаментов на каскадах, так как в этом случае разброс их поперечных размеров меньше, чем случайных неоднородностей рельефа.

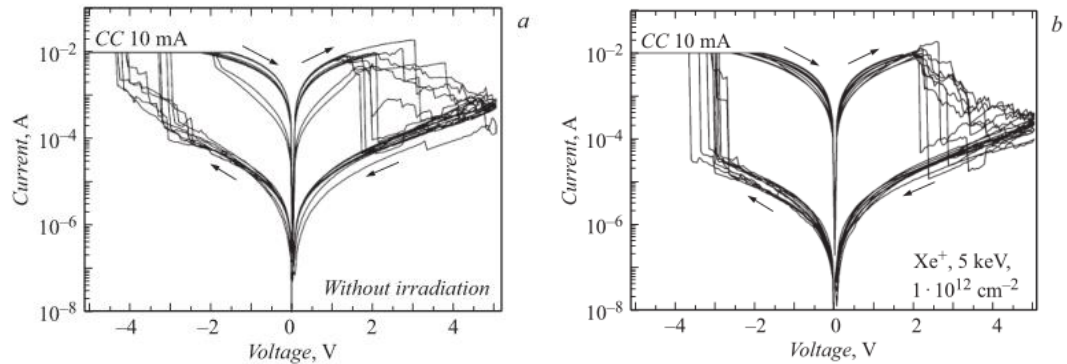


Рисунок 1. ВАХ мемристивных устройств на основе SiO_2 без облучения (а) и (б) с облучением ионами Xe^+ с энергией 5 кэВ и дозой $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

В разделах 2.5 и 2.6 приведены расчеты и реализованы эксперименты, соответствующие варианту 2, указанному в разделе 2.1 (введение примесных атомов и/или дефектов в диэлектрик, контролируя их распределение путем выбора вида ионов, их энергии и дозы), для случая облучения ионами Si^+ пленок SiO_2 и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$, соответственно.

При облучении структуры $\text{Au}/\text{SiO}_2/\text{TiN}/\text{Ti}$ энергия ионов Si^+ была выбрана таким образом, чтобы максимум их распределения приходился на середину пленки SiO_2 . В случае пленок на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ энергия ионов была подобрана так, чтобы их средний проецированный пробег был меньше толщины пленки $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ и, следовательно, радиационные повреждения в пленке практически не затрагивали нижележащие слои. (Последнее требование обусловлено предыдущими исследованиями, выполненными коллегами диссертанта).

На рисунках 2 и 3 представлены результаты измерения ВАХ контрольных и облученных ионами Si^+ структур на основе SiO_2 и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$. Статистическая обработка результатов показала, что облучение ионами кремния с последующим отжигом при 600°C приводит к заметному улучшению параметров мемристивной структуры на основе SiO_2 . Наблюдаемый эффект может быть обусловлен как влиянием атомов кремния на формирование концентраторов электрического поля, так и усилением роли нанокластеров кремния в процессах резистивного переключения. Положительный эффект влияния облучения ионами Si^+ получен также для структур на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y})$.

Для структур на основе SiO_2 с нижним электродом из TiN было проведено исследование количественного состава образцов, а также анализ химического состояния атомов в приграничных слоях оксида на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре SPECS с использованием Mg K_α -излучения ($E=1253.6 \text{ эВ}$) в сочетании с послойным травлением ионами аргона. В результате установлено взаимное проникновение атомов Si , Ti и N на границе SiO_2/TiN .

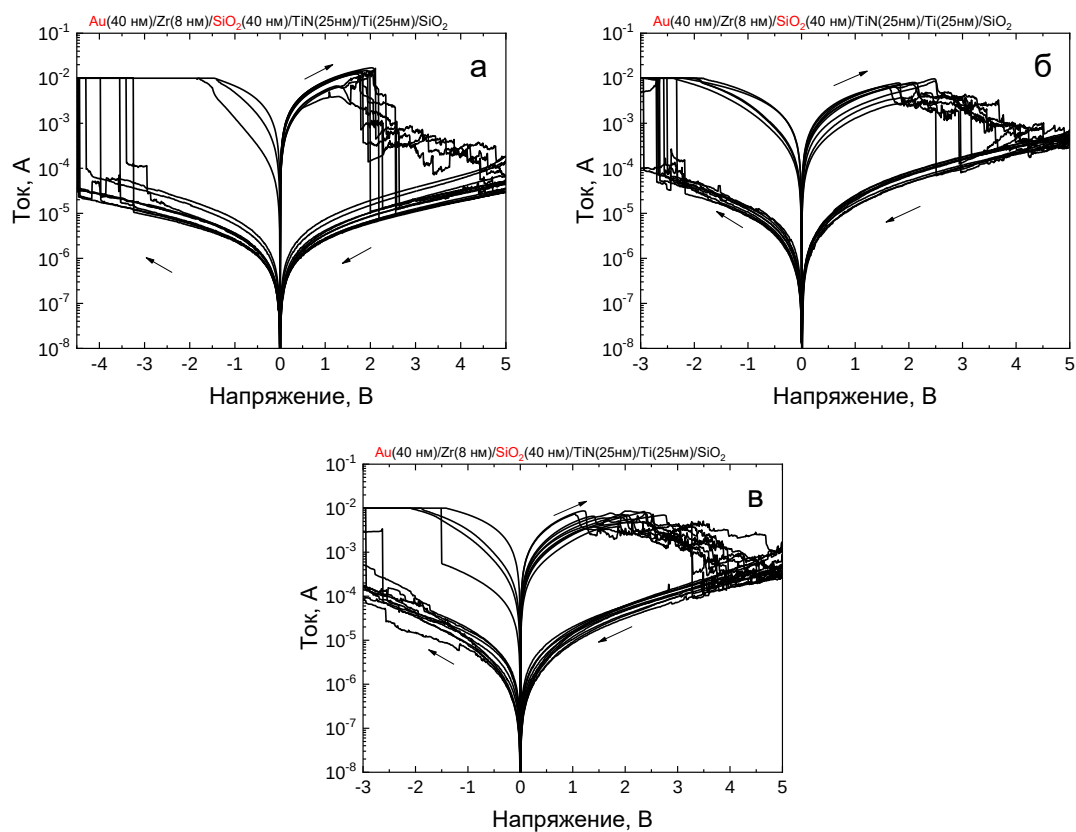


Рисунок 2. ВАХ образцов на основе SiO_2 : (а) контрольного (необлученного и неотожжённого), (б) необлученного и отожжённого при $600\text{ }^\circ\text{C}$, (в) облученного ионами Si^+ (с энергией 20 кэВ и дозой $2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$) и затем отожжённого при $600\text{ }^\circ\text{C}$.

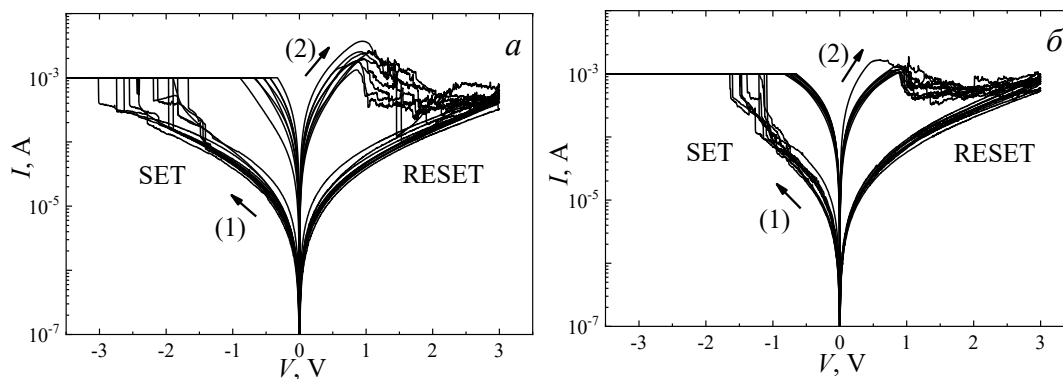


Рисунок 3. ВАХ контрольных (а) и облучённых ионами Si^+ с энергией 6 кэВ и дозой $5.4 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$ (б) образцов на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y})$. Цифрами указана последовательность подачи напряжения.

Глава 3 посвящена обоснованию постановки задачи, описанию методики и результатам моделирования методом молекулярной динамики процессов структурной перестройки в локальном участке филамента при высокой температуре (за счёт выделения джоулевой энергии) как для облученных, так и для необлученных пленок оксида кремния.

В разделе 3.1 (Введение) описаны предпосылки проведения компьютерного моделирования применительно к цели и задачам диссертационной работы. На основе их

анализа были определены варианты расчётов. Моделирование было выполнено для плёнок оксида SiO_x с разной стехиометрией ($x = 2, 1.7, 1.1$), подвергнутых облучению разными дозами ионов Si^+ ($10^{15}, 10^{17} \text{ см}^{-2}$) и Xe^+ (10^{12} см^{-2}), а также с учётом прихода и ухода атомов кислорода, соответствующими операциям переключения мемристора.

Отмечено, что одной из причин стохастического поведения и деградации могут быть структурные изменения в области филамента, происходящие в нагреваемых (за счет выделения джоулевой энергии) филаментах, поскольку температура в локальных участках филамента может превышать 1000°C [3, 4].

Одним из важных результатов исследований других авторов явилось обнаружение улучшения параметров мемристоров на основе SiO_x при отклонении от стехиометрии [5, 6]; причём наилучшие характеристики были получены для оксида $\text{SiO}_{1.1}$.

Раздел 3.2 содержит подробное описание методики расчетов, включающей в себя: алгоритм расчета, перечисление используемых программ (VMD, SRIM, LAMMPS), выбор параметров моделирования и способ обработки данных. На рисунке 4 представлена схема (алгоритм) моделирования.

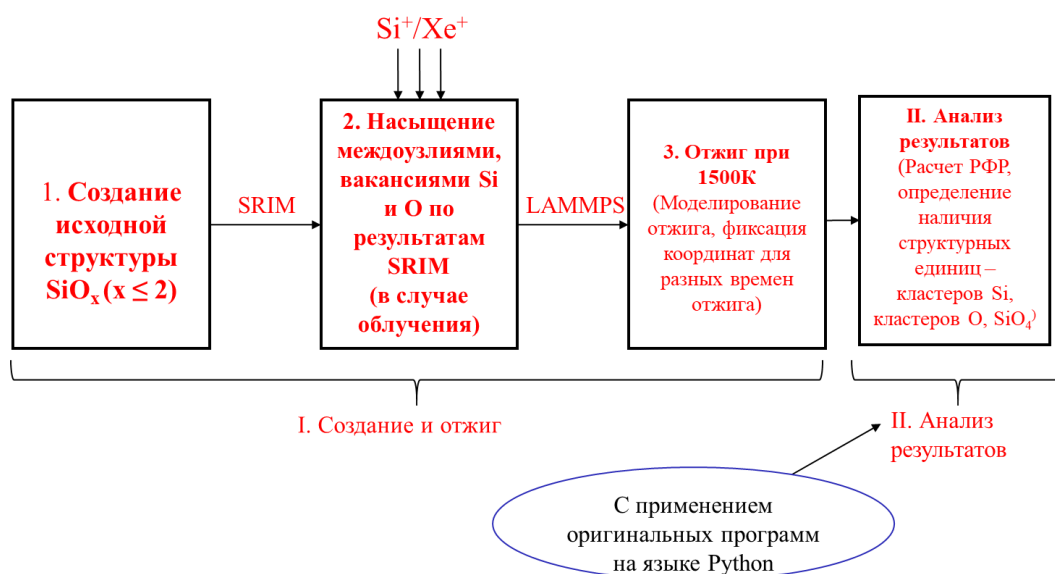


Рисунок 4. Схема молекулярно-динамического моделирования структурной перестройки в локальном участке филамента в пленке SiO_x .

Сначала с применением программы VMD [7] получали модельный объем размером $60 \times 60 \times 60 \text{ \AA}^3$. После этого происходило изменение стехиометрии структуры с помощью оригинальной программы на языке Python. Следующим этапом было применение программы SRIM [8] (учитывалось изменение плотности для SiO_2 разной стехиометрии) для моделирования соответствующего облучения – для расчёта числа смещённых в междоузлия атомов кремния, кислорода и вакансий на разных глубинах пленки оксида, в том числе для глубины 20 нм (что соответствовало половине толщины плёнок, использованных в наших

экспериментах с оксидом). Далее с использованием программы LAMMPS [9] проводилось моделирование постимплантационного отжига при 1500 К [10]. В качестве потенциала межатомного взаимодействия использовался потенциал Терсоффа [11]. Максимальное время слежения за эволюцией структуры филамента составляло 100 нс, что на порядок величины превышало времена, использованные в работах других авторов. Координаты атомов кластера периодически фиксировались с временным промежутком 5 нс. Полученные значения координат использовались для оценки структурных характеристик моделированного объёма с помощью оригинального комплекса программ.

Раздел 3.3 содержит перечисление всех вариантов моделирования 1) Отжиг (термин «отжиг» здесь и далее в этой главе используется в смысле джоулевого нагрева под действием протекающего тока) при 1500 К стехиометрического (чистого) оксида кремния SiO_2 ; 2) Отжиг при 1500 К нестехиометрического оксида $\text{SiO}_{1.7}$; 3) Отжиг при 1500 К оксида $\text{SiO}_{1.1}$, характеризующегося более сильным отклонением от стехиометрии по сравнению с предыдущим вариантом; 4) Отжиг при 1500 К оксида SiO_2 при уходе/приходе атомов кислорода, происходящих при смене полярности напряжения; 5) Постимплантационный отжиг SiO_x ($x = 1.2$ и 1.7), облученного ионами Xe^+ с энергией 5 кэВ и дозой 10^{12} см^{-2} , при разных температурах; 6) Постимплантационный отжиг при 1500 К оксида $\text{SiO}_{1.7}$, облученного Si^+ энергией 20 кэВ и с дозами $1 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Раздел 3.4 включает изложение результатов для каждого варианта. Основным выводом из расчетов является обнаружение образования дефектных комплексов типа Si-Si_n , O-O_n , Si-O_n , O-Si_n в зависимости от степени стехиометричности SiO_x и условий облучения. Прослежена их эволюция в течение 100 нс. На рисунке 5 в качестве примера показаны нормированные РФР Si-Si для случая облучения пленки SiO_x ($x=1.7$) ионами Si^+ с энергией 20 кэВ и дозой 10^{17} см^{-2} . Видно возникновение и сохранение при отжиге пика на $R \sim 2.38 \text{ \AA}$, близкого к таковому для кристаллического кремния $R \sim 2.34 \text{ \AA}$.

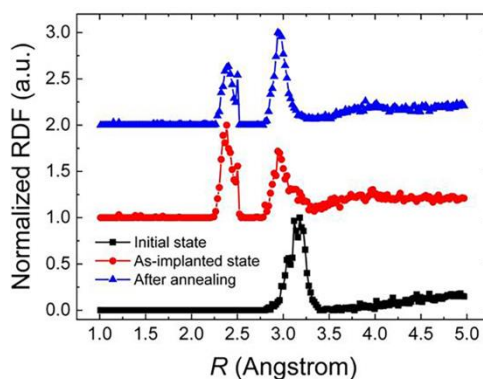


Рисунок 5. Нормализованные функции распределения расстояний Si-Si в исходном $\text{SiO}_{1.7}$ (черная линия), в состоянии непосредственно после имплантации (красная линия) и после 100 нс отжига после имплантации при 1500 К (синяя линия).

В рамках исследования в данной главе было проведено моделирование структурной перестройки зоны филамента мемристора на основе плёнок SiO_x ($x \leq 2$) при облучении ионами Xe^+ и Si^+ для разных параметров. Облучение ионами кремния приводит к образованию нанокластеров Si-Si_n ($n > 5$), приближающихся по структуре к кристаллическому кремнию, чего не наблюдается при облучении ионами Xe^+ . Отмечено, что структура филамента при высокой температуре претерпевает существенные изменения за счёт образования и распада нанокластеров, с характерными временами в единицы или десятки наносекунд. Уход атомов кислорода из зоны филамента приводит к росту кластеров из атомов кремния, обратная миграция кислорода способствует их частичному «рассасыванию».

Результаты моделирования показали сложные процессы перестройки структуры филамента в ходе переключения из/в проводящее состояние. Компьютерное моделирование подтвердило обнаруженную ранее в эксперименте возможность управления параметрами мемристора путем ионной имплантации примесных атомов, и таким образом, оптимизации технологических процессов мемристорных структур. Стохастический характер процессов перестройки структуры SiO_x в области филамента может приводить к постепенному накоплению отрицательных, с точки зрения работы мемристора, изменений и деградации его характеристик. Однако влияние формирующихся кластеров Si и других сложных нановключений на протекание тока по филаментам требует отдельного рассмотрения.

В главе 4 рассмотрена проблема оценки радиационной стойкости мемристоров к воздействию облучением ионизирующими и дефектообразующими высокоэнергетическими частицами – характерными для космического облучения (протоны с энергией ~ 10 МэВ) и быстрыми реакторными нейтронами с энергией ~ 1 МэВ.

В разделе 4.1 содержится вводная информация и указывается на возможность решения задачи имитации радиационной стойкости мемристоров с помощью облучения мемристивных структур ионами средних энергий, что позволяет существенно упростить оценку радиационной стойкости создаваемых мемристоров.

В разделе 4.2 обоснована постановка задачи и приведен полный список исследуемых структур на основе оксидов SiO_2 , $\text{ZrO}_2(\text{Y})$, ZrO_2 , HfO_2 .

В основу разработанной имитационной методики положено представление, являющееся в настоящее время аксиомой, что деградация мемристоров связана с накоплением дефектов в пленке диэлектрика. Нахождение параметров имитационного ионного облучения заключается в определении таких значений параметров, при которых ионы создают ту же степень дефектности в оксидном слое конкретных мемристивных структур, что и соответствующие воздействия в реальных условиях.

В разделе 4.3 излагаются методология и алгоритм определения параметров ионов средних энергий для имитации воздействия реакторными нейтронами на мемристивные структуры на основе аморфного диоксида кремния путем ионного облучения.

Данная задача решалась на основе компьютерного расчета с применением метода Монте-Карло. Необходимо было определить такие дозы и энергии имплантируемых ионов, при которых создается та же степень радиационного повреждения оксидных слоев мемристивных структур, то есть такая же концентрация пар Френкеля (для определенности речь шла о вакансиях), что и при облучении заданной дозой реакторных нейтронов с энергией 10 МэВ.

Основой моделирования дефектообразования при нейтронном облучении была схема расчетов прохождения атомов отдачи (ионов) через твердое тело и образования смещенных атомов [12], аналогичная используемой в программе SRIM. В данном алгоритме разыгрываются прицельные параметры при каждом очередном столкновении с атомами вещества. Далее рассчитывались потери энергии этих атомов между столкновениями, углы рассеяния, энергии после столкновения, направления полета выбитого атома. При каждом столкновении происходила регистрация координаты этого события. Судьба иона и всех выбитых («быстрых») атомов прослеживалась до тех пор, пока их энергия не станет ниже порога смещения E_d . Когда ион или выбитый атом пролетал через слой, состоящий из атомов разного сорта, дополнительно разыгрывался сорт атомов, с которым тот сталкивается.

Итогом расчета (для *нейтронов*) являлось распределение вакансий в оксиде в расчете на 1 нейтрон. Умножая это распределение на заданную дозу нейтронов, получалось распределение вакансий для любой их дозы.

Для расчета профилей смещенных атомов при *ионном* облучении использовалась стандартная программа SRIM [8].

В качестве имитирующих нейтронное облучение ионов целесообразно использовать ионы элементов, которые входят в состав оксида, либо ионы, близкие по массе к этим элементам. Исходя из вышесказанного, для имитации нейтронного облучения структуры на основе SiO_2 выбраны ионы Si^+ и O^+ ; на основе ZrO_2 и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ – ионы Kr^+ и O^+ ; на основе HfO_2 – ионы Xe^{2+} и O^+ .

Выбор энергий, имитирующих облучение нейтронами, связан, во-первых, с необходимостью учета потерь энергии в области верхнего контакта, во-вторых, с требованием получения по возможности однородного профиля потерь упругой энергии в пленке оксида, в-третьих – с техническими условиями используемых имплантеров. С учетом сказанного были выбраны следующие энергии ионов: для SiO_x : Si^+ – 150 кэВ, O^+ – 150 кэВ; для ZrO_2 (с подслоем Zr): Kr^+ – 80 кэВ, O^+ – 150 кэВ; для HfO_2 : Xe^{2+} – 150 кэВ, O^+ – 150 кэВ; для ZrO_2 (с подслоем Ta): Kr^+ – 120 кэВ, O^+ – 120 кэВ. В случае имитации ионизирующего воздействия выбраны ионы H^+ с энергией 150 кэВ.

В **разделах 4.4** приведены результаты соответствующих расчётов. Для случая ионизирующего излучения результаты представлены на рисунке 6 для мемристивных структур на основе SiO_2 различных конструктивных вариантов. Приведены распределения потерь энергии на ионизацию при облучении протонами с энергией 10 МэВ и ионами водорода с энергией 150 кэВ, рассчитанные программой SRIM. Там же указаны значения

коэффициента β (отношение плотности потерь в средней части рабочего оксида для этих частиц). Из рисунка 6 следует, что значения β отличаются мало и колеблются в пределах $\sim 9-14$.

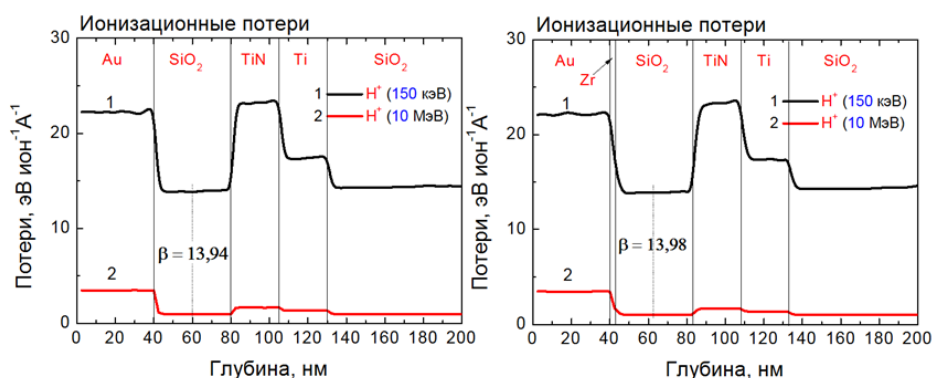


Рисунок 6. Расчетные профили ионизационных потерь энергии при облучении протонами с энергией 150 кэВ и космическими протонами со средней энергией 10 МэВ мемристивных структур на основе SiO_2 .

В случае дефектообразующего облучения рассчитаны концентрации вакансий, созданных при ионном и нейтронном облучениях, и найдены такие дозы ионов, чтобы концентрации созданных ими вакансий на глубине, соответствующей середине оксида, совпадали с концентрацией вакансий при нейтронном облучении.

На рисунке 7 приведены рассчитанные программой SRIM распределения вакансий при облучении ионами Si^+ и O^+ пленки SiO_2 (для имитации трех доз нейтронов 10^{15} , 10^{16} и 10^{17} см^{-2}), при которых достигается эквивалентность упругих потерь при достаточно высокой однородности потерь в пределах оксида.

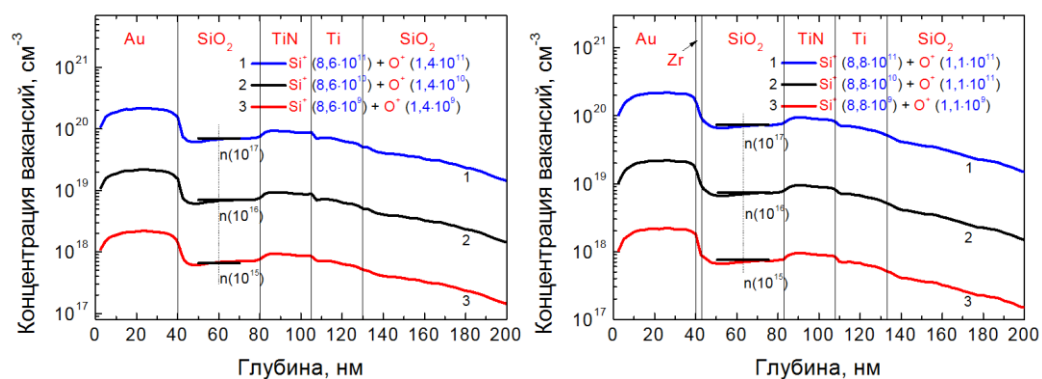


Рисунок 7. Расчетные распределения концентрации вакансий в мемристивных структурах на основе SiO_x , облученных ионами Si^+ и O^+ .

В разделе 4.5 приведены результаты имитационного эксперимента ионно-лучевой имитации для указанных выше структур. Детали экспериментов по осаждению

тонкопленочных структур указаны в опубликованных работах [1, A1]. Для получения мемристивного эффекта структура после изготовления подвергалась формовке путем подачи отрицательного напряжения.

Эксперименты проводились следующим образом. Каждая структура после формовки подвергалась пятикратному переключению из СНС в СВС и обратно (пять циклов переключения), после чего проводилось облучение ионами. При этом перед облучением одни структуры были переведены в СНС, другие – в СВС, так как результат облучения может зависеть от исходного состояния. После облучения в обоих случаях измерялись токи при напряжении считывания. Перед переходом к следующему сеансу облучения, со структурой проводились те же манипуляции с подачей отрицательного и положительного напряжений, что и для исходной структуры, и, если переключение из одного состояния в другое сохранилось, структура переводилась в нужное состояние, после чего следовало очередное облучение до заданной дозы.

На рисунке 8а приведены результаты измерения токов при +0.5 В для исходных мемристивных структур и структур, облученных в двух состояниях (СВС или СНС) ионами H^+ с энергией 150 кэВ. Существенных изменений ВАХ вплоть до дозы $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в большинстве случаев не наблюдается, а в тех случаях, когда облучение вызывает спонтанные изменения резистивного состояния при облучении в СВС (изменения показаны стрелками), они исчезают после первого же цикла перезаписи. На рисунке 8б приведены результаты эксперимента по имитации дефектообразующего облучения.

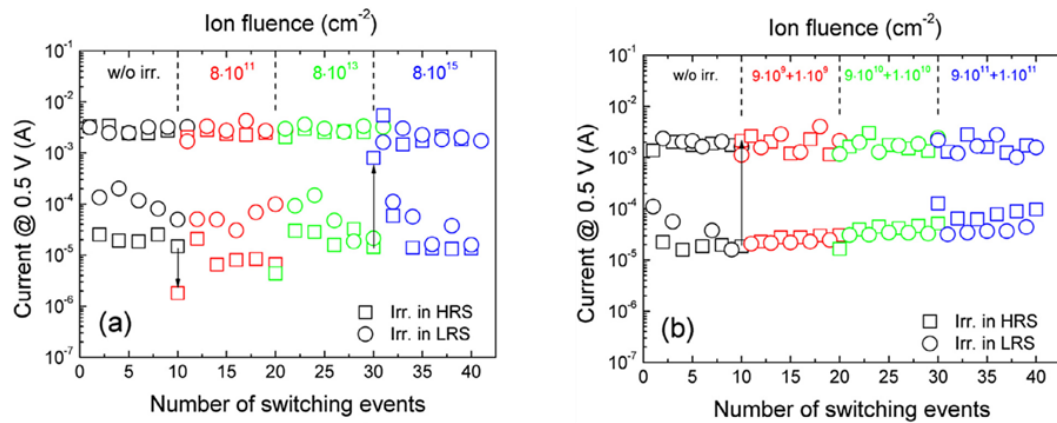


Рисунок 8. Зависимость значений тока (измеренных при +0.5 В) в СНС и СВС в необлученных структурах и облученных (а) ионами H^+ и (б) ионами ($Si^+ + O^+$) от числа переключений после каждого последующего накопления дозы облучения. Облучение проводилось для структур, переключенных в СВС (Irr. in HRS) и СНС (Irr. in LRS). Стрелки указывают на случайные выбросы тока.

Случайные сбои (показанные стрелками на рисунке 8а), по-видимому, связаны с захватом образующихся дырок ловушками, локализованными в зазоре между проводящей частью филамента и верхним электродом [13] и обусловлены перераспределением

встроенного заряда, что, в свою очередь, вызывает изменение электрического поля в зазоре и дрейф точечных дефектов под действием этого поля. В результате указанных процессов происходит изменение сопротивления участка, по которому протекает ток. Последующее приложение отрицательного и положительного напряжения приводит к восстановлению и локальному окислению участка филамента, и восстановлению прежнего состояния. Заметим, что, согласно расчетам, максимальная использованная доза ионного облучения эквивалентна экстремально большому флюенсу космических протонов (10^{17} см^{-2}).

Из рисунка 8b следует, что вплоть до максимальной дозы облучения ($\text{Si}^+ + \text{O}^+$), эквивалентной, согласно расчету, флюенсу 10^{17} см^{-2} реакторных нейтронов с энергией $\sim 1 \text{ МэВ}$, переключение сохраняется. Видно также, что значения токов в большинстве случаев испытывают изменения, не превышающие разброс значений для исходных структур. В некоторых случаях непосредственно после облучения в СВС значение тока возрастает (так же, как и в случае протонного воздействия), но после первого же цикла перезаписи резистивные состояния воспроизводятся (с учетом разброса). В случае облучения в СНС существенных изменений токов вообще не наблюдалось.

Высокая степень радиационной стойкости изучаемых мемристоров связана с тем, что в них после формовки ток протекает не по всей площади структуры, а по филаментам с очень малыми поперечными сечениями (порядка нанометра) и с большой концентрацией точечных дефектов [13]. В состоянии СНС филаменты пронизывают практически всю толщину активного диэлектрика, а в СВС между проводящей областью филамента и одним из электродов существует малая область с низкой проводимостью и относительно малой концентрацией точечных дефектов. При облучении существует вероятность значительного увеличения концентрации точечных дефектов в этой области – за счет захвата заряда при ионизационных потерях ионов или при непосредственном попадании в данную область каскада смещений, и тогда происходит обратимое возрастание тока. То, что состояние СВС всегда воспроизводится после проведения следующего полного цикла переключения, означает, что внесенные облучением дефекты при этом полностью или почти полностью исчезают в ходе реакций восстановления-окисления.

Таким образом, с помощью облучения ионами средних энергий (150 кэВ) возможно предсказать поведение мемристивных структур при высокоэнергетических радиационных воздействиях. Для того чтобы оценить адекватность такого прогноза по отношению к облучению высокоэнергетическими протонами, характерными для космического излучения, мемристивная структура на основе SiO_2 подвергалась облучению протонами с энергией 15 МэВ на циклотроне МГЦ-20. Результат измерения представлен на рисунке 9.

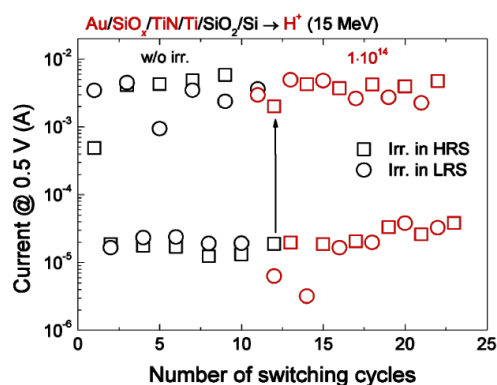


Рисунок 9. Зависимость значений тока в СНС и СВС для необлученных устройств на основе SiO₂ и облученных ионами H⁺ (15 МэВ) по числу переключений до и после облучения на циклотроне.

Видно, что при дозе 10^{14} см⁻² необратимые изменения тока в обоих резистивных состояниях отсутствуют, что находится в согласии с результатами облучения протонами при энергии 150 кэВ (рисунок 8). Наблюдается одно спонтанное обратимое увеличение тока при облучении в СВС, как и при облучении ионами средних энергий. Этот результат подтверждает адекватность имитации радиационной стойкости при облучении протонами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной диссертационной работы проведено экспериментальное и теоретическое (компьютерное) исследование процессов, происходящих в пленках оксида кремния и мемристорных структурах на их основе, а также мемристорных структурах на базе пленок стабилизированного иттрием диоксида циркония, с целью выяснения путей улучшения рабочих параметров мемристоров и их воспроизводимости. Проведены расчеты оптимальных условий облучения и соответствующие эксперименты с целью улучшения рабочих параметров мемристоров на основе оксида кремния путем образования пространственно разделенных каскадов смещения в приповерхностной области оксида посредством облучения тяжелыми ионами Xe⁺. Изучено влияние облучения ионами Si⁺ структур на основе SiO₂ и ZrO₂(Y) на рабочие параметры мемристоров и их воспроизводимость. Исследования показали, что применение ионной имплантации позволяет улучшить и снизить разброс рабочих параметров мемристоров. Для изучения влияния облучения и высокотемпературного нагрева (постимплантационного отжига) на структурные изменения в области филамента в пленках SiO_x ($x \leq 2$) было проведено молекулярно-динамическое моделирование. Оно продемонстрировало формирование нанокластеров кремния и комплексов (O-O_n, Si-O_n, O-Si_n) в процессе работы мемристора.

В связи с тем, что мемристоры являются перспективными элементами функциональных схем для применения в космических аппаратах и аппаратуре ядерной энергетики, необходимо проводить их испытания на стойкость к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами. Предложен и апробирован метод имитации

(физического моделирования) стойкости мемристоров к такому воздействию посредством облучения ионами средних энергий при условии обеспечения эквивалентности энергетических потерь (ионизационных и упругих).

Основные выводы по диссертационной работе

1. Впервые установлено и интерпретировано с физической точки зрения явление, состоящее в том, что каскады смещения, формирующиеся в приповерхностной области пленок, на основе которых изготовлены мемристоры, приводят к улучшению и снижению разбросов их рабочих параметров.

2. Впервые методом молекулярной динамики установлено, что облучение пленок SiO_2 и SiO_x ($x < 2$) ионами кремнием с последующим отжигом приводит к формированию комплексов типа Si-Si_n , O-Si_n , Si-O_n , O-O_n , причем это происходит за времена, меньшие 100 нс.

3. Предложен, обоснован и экспериментально апробирован способ имитационного моделирования путем облучения ионами средних энергий стойкости параметров мемристоров на основе пленок SiO_2 и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ к облучению космическими протонами и реакторными нейтронами.

Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в рецензируемых периодических изданиях, индексируемых в Scopus и рекомендованных ВАК РФ:

[A1] 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.

[A2] 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.

[A3] 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

[A4] 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

[A5] 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

[A6] 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.

[A7] 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.

Главы в коллективных монографиях:

[A8] Ion implantation in the technology of metal-oxide memristive devices / D.I. Tetelbaum, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.S. Korolev, E.V. Okulich, V.I. Okulich, R.A. Shuisky, D.V. Guseinov, E.G. Gryaznov, O.N. Gorshkov // *Ion Implantation: Synthesis, Applications and Technology* / A.D. Pogrebnyak (Ed.) – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2018. – P.1-40. ISBN: 978-1-53613-962-4.

[A9] Resistive switching in metal-oxide memristive materials and devices / A.N. Mikhaylov, M.N. Koryazhkina, D.S. Korolev, A.I. Belov, E.V. Okulich, V.I. Okulich, I.N. Antonov, R.A. Shuisky, D.V. Guseinov, K.V. Sidorenko, M.E. Shenina, E.G. Gryaznov, S.V. Tikhov, D.O. Filatov, D.A. Pavlov, D.I. Tetelbaum, O.N. Gorshkov, B. Spagnolo // In: *Metal oxides for Non-Volatile Memories: Materials, Technology and Applications* / I. Valov, P. Dimitrakakis, S. Tappertzhofen (Eds.) – Elsevier, 2022. – 536 p. ISBN: 978-0-12814-629-3.

[A10] Technology and neuromorphic functionality of magnetron-sputtered memristive devices / A.N. Mikhaylov, M.N. Koryazhkina, D.S. Korolev, A.I. Belov, E.V. Okulich, V.I. Okulich, I.N. Antonov, R.A. Shuisky, D.V. Guseinov, K.V. Sidorenko, M.E. Shenina, E.G. Gryaznov, S.V. Tikhov, D.O. Filatov, D.A. Pavlov, D.I. Tetelbaum, O.N. Gorshkov, A.V. Emelyanov, K.E. Nikiruy, V.V. Rylkov, V.A. Demin, B. Spagnolo // In: *Metal oxides for Non-Volatile Memories: Materials, Technology and Applications* / I. Valov, P. Dimitrakakis, S. Tappertzhofen (Eds.) – Elsevier, 2022. – 536 p. ISBN: 978-0-12814-629-3.

Список цитированной литературы

1. Mikhaylov, A.N. Bipolar resistive switching and charge transport in silicon oxide memristor / A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.V. Guseinov, D.S. Korolev, I.N. Antonov, D.V. Efimov, S.V. Tikhov, A.P. Kasatkin, O.N. Gorshkov, D.I. Tetelbaum, E.G. Gryaznov, A.P. Yatmanov // *Materials Science and Engineering B*. – 2015. – №194. – P. 48–54. – DOI: 10.1016/j.mseb.2014.12.029.

2. Sadi, T. Advanced Physical Modeling of SiO_x Resistive Random Access Memories / T. Sadi, L. Wang, D. Gao, A. Mehonic, L. Montesi, M. Buckwell, A. Kenyon, A. Shluger, A. Asenov // *International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD)*. – 2016. – p.149–152.

3. Pahinkar, D. G. Experimental and computational analysis of thermal environment in the operation of HfO₂ memristors / G. Pahinkar D., Basnet Pr., P. West M. et.al. // *AIP Advances*. – 2020. – №10. – P. 035127. – DOI: 10.1063/1.5141347.

4. Ma, Y. Formation of the Conducting Filament in TaO_x Resistive Switching Devices by Thermal-Gradient-Induced Cation Accumulation / Ya. Ma, D. Li, A.A. Herzing et. al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2018. – №10(27). – P. 23187. – DOI: 10.1021/acsami.8b03726.
5. Wang, Y. Resistive switching mechanism in silicon highly rich SiO_x ($x < 0.75$) films based on silicon dangling bonds percolation model / Y. Wang, X. Qian, K. Chen K. et al. // Applied Physics Letters. – 2013. – №102(4). – P. 042103. – DOI: 10.1063/1.4776695.
6. Михантьев, Е.А. Влияние монооксида кремния на процесс формирования кремниевых нанокластеров (моделирование методом Монте-Карло) / Михантьев Е.А., Неизвестный И.Г., Усенков С.В. и др. // Физика и техника полупроводников. – 2014. – №48. вып. 7. – С. 917-925.
7. <https://tcbg.illinois.edu/Research/vmd>
8. Ziegler, J.F. SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010) / J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. – 2010. – Vol.268(11-12). – P. 1818-1823. – DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091.
9. <https://www.lammps.org/>
10. Захаров, П.С. Эффект обратимого переключения электрической проводимости в тонких плёнках нестехиометрического оксида кремния: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.27.01: Захаров Павел Сергеевич. – Москва, 2016. – 160 с.
11. Munetoh, S. Interatomic potential for Si–O systems using Tersoff parameterization / S. Munetoh, T. Motooka, K. Moriguchi, A. Shintani // Comput. Mater. Sci. – 2007. – №39. – P.334-339. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2006.06.010.
12. Tetelbaum, D.I. Ion-beam simulation of radiation damage produced by fast neutrons in heterophase structures / D.I. Tetelbaum, D.V. Guseinov, V.K. Vasiliev, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.S. Korolev, S.V. Obolensky, A.N. Kachemtsev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2014. – V.326. – P. 41-44. – DOI: 10.1016/j.nimb.2013.10.067.
13. Wang, Y. The x dependent two kinds of resistive switching behaviors in SiO_x films with different x component / Y. Wang, K. Chen, X. Qian, Z. Fang, W. Li, J. Xu // Appl. Phys. Lett. – 2014. – V.104. – P.012112. – DOI: 10.1063/1.4861592.