

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Окулич Евгении Викторовны «Ионно-лучевая модификация параметров мемристоров на основе  $\text{SiO}_x$  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 наноэлектроники, квантовых устройств

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из Введения, 4 глав, Заключение и Приложение. 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. Следует отметить, что объем и структура работы соответствуют требованиям «Положения» по оформлению диссертации. Материал диссертационной работы представлен в последовательности четко сориентированной на достижение поставленной общей цели и решение сформулированных во введении задач.

### **Актуальность темы диссертационной работы.**

Одним из наиболее перспективных направлений в области информационных и нейроморфных технологий в настоящее время является создание и изучение элементов энергонезависимой памяти на основе эффекта резистивного переключения (РП) – мемристоров. В последнее десятилетие исследованиям в этой области посвящено значительное количество публикаций. Но для широкого практического применения мемристоров необходимо решение проблем, обусловленных рядом недостатков этих устройств: разброс параметров РП (напряжения переключения и значения сопротивлений в состояниях СВС и СНС) - что является весьма критичным с точки зрения возможности промышленной реализации электронных (в том числе нейроморфных) схем на основе мемристоров. Для решения данных проблем необходимы фундаментальные знания о структуре, морфологии и связанных с ними физических принципах работы мемристоров, особенно, о процессах атомной перестройки в филаменте. Магистральным путем улучшения параметров мемристоров является разработка методом управления распределения дефектов в диэлектрике, что наиболее эффективно реализуется с помощью ионной имплантации путем рационального выбора

параметров таких как вид ионов, их энергия, доза, режим постимплантационного отжига. Большим преимуществом данного метода является также совместимость с традиционной технологией полупроводниковой микроэлектроники. Наиболее используемыми в качестве материала 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. Вторым материалом, рассматриваемым в данной диссертации – стабилизированный иттрием диоксид циркония ( $ZrO_2(Y)$ , СДЦ)- выбран из-за ряда существенных преимуществ, среди которых самым важным является возможность путем регулирования концентрации иттрия получать оптимальную концентрацию вакансий, играющих ключевую роль в функционировании мемристоров. Отмечено, что к началу выполнения диссертационного исследования уже были попытки создания мемристивных устройств на основе пленок аморфного оксида кремния, основанные на теоретических и экспериментальных работах, в которых обнаружены и изучены мемристивные эффекты. Однако оставались слабо изученными физические процессы, лежащие в основе ионно-лучевой модификации параметров мемристоров. Для изучения структурных изменений в области филамента при работе мемристора, подвергнутого облучению, автором проведено моделирование методом молекулярной динамики и разработаны оригинальные программы для обработки полученных данных. Кроме того, ранее 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. Поэтому актуальность диссертационной работы Е.В. Окулич, посвященной исследованию ионно-лучевой модификации параметров мемристоров на основе  $SiO_x$  и  $ZrO_2(Y)$  и имитационному моделированию их радиационной стойкости, не вызывает сомнений.

**Анализ содержания диссертации.** 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.

В *первой главе* представлен литературный обзор по теме диссертационной работы, включающий в себя описание экспериментальных исследований и модельных

представлений о процессах резистивного переключения. На основании проведенного анализа литературных данных автором сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во *второй главе* приведены оригинальные экспериментальные результаты по ионно-лучевой модификации рабочих параметров мемристорных структур на основе оксидов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2(\text{Y})$  и их интерпретация. Рассмотрены два варианта облучения пленок оксидов ионами средних энергий для: 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. Физически обоснованы предлагаемые варианты и пути их практической реализации, включающие, в частности, необходимость проведения теоретических расчетов для получения требуемых результатов. Экспериментально установлено, что облучение мемристивных структур на основе  $\text{SiO}_2$  ионами  $\text{Xe}^+$  с рассчитанной по этой методике дозой не только снижает разброс параметров мемристоров, но и повышает отношение сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях. Показано, что облучение пленок оксида кремния и стабилизированного иттрием диоксида циркония ионами  $\text{Si}^+$  приводит к значительному улучшению параметров мемристоров, созданных на базе этих пленок.

В *третьей главе* представлены результаты моделирования методом молекулярной динамики структурной перестройки в мемристивных структурах (в области филаментам) на основе  $\text{SiO}_x$  при 1500K при различных условиях стехиометрии и облучения. Предварительно проведено обоснование постановки задачи изучения структурной перестройки в данных структурах и описание методики. Обработка данных проводилась оригинальными программами, написанными автором на языке Python. Результаты моделирования показали, что моделируемая структура филамента при высокой температуре (за счет джоулевого нагрева) претерпевает существенные изменения из-за образования и распада нанокластеров (кремния и других комплексов), с характерными временами в единицы или десятки наносекунд. Уход атомов кислорода из зоны филамента приводит к росту кластеров из атомов кремния, а обратная миграция кислорода способствует их частичному «рассасыванию». Компьютерное моделирование подтвердило обнаруженную ранее в эксперименте возможность управления параметрами мемристора путем ионной имплантации примесных атомов, и таким образом, оптимизации технологических процессов мемристорных структур.

В четвертой главе рассмотрена проблема оценки радиационной стойкости мемристоров к воздействию облучением ионизирующими и дефектообразующими высокоэнергетическими частицами – характерными для космического облучения (протоны с энергией  $\sim 10$  МэВ) и быстрыми реакторными нейтронами с энергией  $\sim 1$  МэВ. В рамках исследования автором предложена, реализована и апробирована оригинальная методика проведения расчетов и экспериментов по имитации радиационного воздействия. В результате получены параметры облучения для имитации обоих видов облучения различных структур и показана высокая степень их радиационной стойкости.

В заключении приведены основные выводы диссертационной работы.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе получен ряд новых результатов, среди которых хотелось бы выделить следующие:

- 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 (при определённых режимах облучения);

- впервые методом молекулярной динамики установлено, что легирование пленок  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiO}_x$  ( $x < 2$ ) кремнием путём ионного облучения с последующим отжигом при 1500 К приводит к формированию комплексов типа  $\text{Si-Si}_n$ ,  $\text{O-Si}_n$ ,  $\text{Si-O}_n$ ,  $\text{O-O}_n$ , причем это происходит за времена, меньшие 100 нс. В пленках  $\text{SiO}_x$  ( $x < 2$ ), не подвергнутых облучению, этот эффект также имеет место при наличии высокой концентрации кислородных вакансий, соответствующей стехиометрии;

- 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  $\text{SiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ .

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов, положений, выносимых на защиту, и выводов подтверждается использованием современных теоретических методов компьютерного моделирования, современного аналитического и измерительного оборудования, анализом и статистической обработкой результатов измерений.

### **Практическая значимость полученных результатов.**

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.

### **Апробация работы.**

Результаты диссертационной работы являются новыми и оригинальными, они были доложены на многочисленных Международных и Всероссийских конференциях и опубликованы в 7 рецензируемых статьях, индексируемых в Scopus/WoS/RSCI, в том числе опубликованных в высокорейтинговых международных журналах, в 3 главах коллективных монографий, 2 учебно-методических пособиях, также получено 1 свидетельство государственной регистрации программы на ЭВМ. Все основные научные выводы диссертационной работы подтверждены публикациями в рецензируемых изданиях.

**Содержимое автореферата** раскрывает основные результаты и выводы диссертации, соответствует перечню опубликованных работ. Материал автореферата позволяет раскрыть главные достоинства работы.

### **Замечания и недостатки по содержанию и оформлению диссертации:**

1. Странно выглядит изменение сопротивления из высокоомного состояния после обработки дозой ионов водорода  $5,4 \cdot 10^{13}$  которое стало на порядок величины меньше чем сопротивление структуры в низкоомном состоянии (рис.22а), такой эффект не наблюдается при других дозах облучения и другими ионами, хотелось объяснения такому поведению.

2. В таблице к рис.24 нет единиц измерения параметров  $\chi$  и  $\gamma$ .

3. Логика раздела 2.4 трудно поддается осмыслению. Из приведенных значений в таблицах 1, 2а и 2б только доза облучения  $1 \cdot 10^{13}$  уверенно показывает уменьшение

напряжения формовки, среднеквадратичного отклонения, напряжение переключения SET и его среднеквадратичного отклонения, не уверенное напряжение переключения RESET и достаточно значимое уменьшение среднеквадратичного отклонения, при меньших дозах результаты, мягко говоря не однозначные. И как доказательство выводов приводятся сравнительные ВАХ исходного образца и после облучения  $1 \cdot 10^{12}$ . Кривые, как и следовало ожидать из таблиц, в явном виде не демонстрируют какого-либо улучшения характеристик. И в конце раздела делается предположение о геометрических факторах возможности окисления проводящего филамента с выводами о увеличении отношения  $R_{\text{свс}}/R_{\text{снс}}$  хотя данная экспериментальная характеристика не демонстрировалась.

4. Сравнивая рис. 29б и 30б можно сказать, что относительная концентрация  $\text{SiO}/\text{SiO}_2$  возросла после ионной имплантации Si, что выглядит вполне естественно, но автор этот вопрос упускает и утверждает, что «использованные режимы не оказывают значительного влияния на количественные характеристики распределения и химическое состояние элементов» в них. А на этом факте можно было бы играть.

5. Раздел 2.6 «Влияние облучения ионами  $\text{Si}^+$  на параметры мемристоров на основе стабилизированного диоксида циркония» демонстрирует значимый практический результат в плане улучшения мемристивных свойств структуры  $\text{Au}(40\text{нм})/\text{Ta}(40\text{нм})/\text{ZrO}_2(\text{Y})(20\text{нм})/\text{Pt}(40\text{нм})/\text{Ti}(10\text{нм})$  после облучения ионами Si. Однако объяснения сводятся к радиационным повреждениям функционального слоя, тогда не понятно почему таких результатов не продемонстрировало облучение данной структуры ионами  $\text{Ne}^+$  и не попробовать в качестве радиационных элементов  $\text{Xe}^+$ . Тогда вопрос о влиянии самих атомов Si как легирующего элемента отпал.

Однако указанные замечания не умаляют значимости и достоинства диссертационного исследования. Диссертационная работа «Ионно-лучевая модификация параметров мемристоров на основе  $\text{SiO}_x$  и  $\text{ZrO}_2(\text{Y})$  и имитационное моделирование их радиационной стойкости» является законченной работой, содержащей большой объем важных результатов, представляющих научную и практическую значимость, соответствует паспорту специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств и отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. Материал

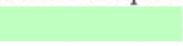
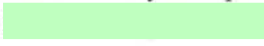
диссертации свидетельствует о высокой квалификации диссертанта. Полагаю, что автор данной диссертационной работы Окулич Евгения Викторовна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (научная специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния), профессор,  
профессор кафедры твердотельной электроники  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Воронежский государственный  
технический университет» (ВГТУ)  
Ситников Александр Викторович

 06 декабря 2024 г.

Контактные данные:

394026, г. Воронеж, Московский проспект, д. 14,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Воронежский государственный технический университет»,  
тел. +7 , адрес электронной почты: 

Подпись профессора кафедры твердотельной электроники ВГТУ  
доктора физико-математических наук, профессора СИТНИКОВА А.В. удостоверяю

Проректор по науке и  
инновациям ВГТУ

доктор технических наук, доцент



 Башкиров Алексей Викторович