

УДК 621.382

На правах рукописи



Свириденко Мария Андреевна

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ
ПЛЕНОК ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
МЕМРИСТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАМЯТИ**

Специальность 1.3.5 - Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель: Сахаров Юрий Владимирович, д-р техн. наук, заведующий кафедрой физической электроники, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск.

Официальные оппоненты: Юрьев Юрий Николаевич, канд. техн. наук, учебный мастер Научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга (ИЯТШ), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск;

Максименко Юрий Николаевич, д-р техн. наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится 03 февраля 2027 года с 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.03 при ФГАОУ ВО «ТУСУР» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «ТУСУР» по адресу г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также на официальном сайте ТУСУР по ссылке: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/2fmffefc>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

канд. техн. наук

А.В. Казаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Дальнейшее уменьшение топологических норм традиционных типов памяти (DRAM, Flash) сталкивается с фундаментальными физическими ограничениями, проявляющимися в росте токов утечки, снижении надёжности и ухудшении энергоэффективности. В связи с этим актуальным направлением микро- и наноэлектроники является создание альтернативных энергонезависимых запоминающих устройств на основе мемристоров — четвёртого пассивного элемента электрических цепей, способного изменять своё сопротивление под действием электрического сигнала и сохранять состояние после отключения питания. На основе мемристорных структур возможно построение вычислительных систем, архитектурно отличных от фон-неймановской парадигмы, что позволяет обоснованно ожидать существенного повышения быстродействия. Это определяется высоким быстродействием мемристорных структур, низким энергопотреблением и потенциально высокой плотностью интеграции. Указанные свойства открывают возможность применения мемристоров не только в качестве ячеек резистивной памяти с произвольным доступом (ReRAM), но и для реализации нейроморфных вычислений, опирающихся на аналоговую модуляцию проводимости, а также архитектур вычислений в памяти. Такие архитектуры устраняют узкое место присущее фон-неймановской организации, поскольку пересылка данных между памятью и процессором в них исключается.

Однако широкому практическому внедрению мемристоров препятствуют два принципиальных ограничения. Первое состоит в значительном разбросе значений сопротивления и напряжений переключения как от цикла к циклу, так и от элемента к элементу, то есть в нестабильности параметров. Второе обусловлено малым числом циклов перезаписи, которое типичный образец выдерживает до деградации, что характеризует его ограниченную долговечность. Оба ограничения в значительной степени определяются структурно-морфологическими особенностями активного диэлектрического слоя и состоянием границы раздела «электрод — диэлектрик», однако количественные связи между технологическими параметрами осаждения, морфологией плёнки и

воспроизводимостью резистивного переключения изучены недостаточно.

Среди диэлектрических материалов для активного слоя мемристоров широко исследуются оксид гафния (HfO_2) и оксид циркония (ZrO_2) благодаря высокой диэлектрической проницаемости, термической и химической стабильности, способности формировать проводящие филаменты в составе структур металл–диэлектрик–металл под действием электрического поля, а также совместимости с кремниевой технологией. Таким образом, разработка и исследование мемристорных структур на основе HfO_2 и ZrO_2 , направленные на установление связей между режимами осаждения, структурой активного слоя и электрофизическими параметрами элементов, являются актуальной научно-технической задачей, решение которой создаёт элементную базу для энергонезависимой памяти и вычислительных систем нового поколения.

Цель работы – разработка технологии формирования тонких диэлектрических слоев ZrO_2 и HfO_2 , а также анализ их электрофизических свойств для создания мемристорных элементов энергонезависимой памяти.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1) отработать режимы получения тонких диэлектрических слоев ZrO_2 и HfO_2 методом магнетронного распыления для получения мемристорных элементов памяти;

2) провести исследование влияния режимов получения тонких диэлектрических слоев ZrO_2 и HfO_2 на их электрофизические свойства, морфологию и внутреннюю структуру;

3) оптимизировать технологические параметры осаждения и толщину тонких диэлектрических слоев ZrO_2 и HfO_2 , обеспечивающих высокую воспроизводимую и стабильность характеристик мемристорных элементов энергонезависимой памяти;

4) провести подбор материалов электродов, совместимых с тонкими диэлектрическими слоями ZrO_2 и HfO_2 , а также отработать технологию их получения, обеспечивающую стабильность переключения и высокие электрические характеристики мемристорных элементов памяти;

5) определить основные параметры мемристорных структур на основе диэлектрических слоев ZrO_2 и HfO_2 ; оценить перспективы их использования для создания мемристорных элементов энергонезависимой памяти.

Методология и методы исследования. В работе применена комплексная методология, включающая теоретический анализ, экспериментальное исследование и аналитическую обработку данных.

В диссертационном исследовании проведен комплексный анализ литературы, включающий в себя системный обзор отечественных и зарубежных публикаций, позволивший определить текущее состояние проблемы и выявить направления для дальнейших исследований. Основные результаты, позволившие сформировать основные научные положения диссертационной работы, получены экспериментальными методами. Для формирования пленок активного диэлектрика использовался метод реактивного магнетронного распыления, а для создания требуемого рисунка применялась фотолитография. Исследование электрических характеристик проводилось с помощью специализированного измерительного оборудования. Элементный анализ проводился на энергодисперсионном спектрометре, исследование морфологии поверхности осуществлялось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для определения степени достоверности полученных результатов проводился сравнительный анализ с данными, полученными другими авторами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) определены оптимальные условия формирования стехиометрических плёнок ZrO_2 с шероховатостью менее 1 нм методом реактивного магнетронного распыления: скорость осаждения $0,2 \text{ \AA/s}$, расход кислорода $9 \text{ см}^3/\text{мин}$, ток разряда $0,6 \text{ А}$, давление $0,15 \text{ Па}$;

2) установлено, что формирование в пленках ZrO_2 нанокompозитной структуры, состоящей из ультрамелких кристаллических областей (1–2 нм), заключенных в аморфной матрице, способствует воспроизводимому VCM-механизму резистивного переключения;

3) показано, что наличие ультрамелких кристаллических областей (1–2 нм) в аморфной матрице пленок ZrO_2 обеспечивает

высокую воспроизводимость вольт-амперных характеристик мемристоров в режиме переключения;

4) достигнуто отношение сопротивлений $R_{off}/R_{on} = 16,45$ для мемристоров на основе ZrO_2 ;

5) установлена количественная взаимосвязь между шероховатостью диэлектрического слоя мемристора и отношением сопротивлений R_{off}/R_{on} : увеличение шероховатости свыше 1 нм приводит к снижению R_{off}/R_{on} вследствие возникновения областей с локальной повышенной напряженностью электрического поля;

6) доказано, что уменьшение шероховатости пленок ZrO_2 менее 1 нм способствует более равномерному распределению электрического поля на границе раздела «электрод – активный слой», что увеличивает вклад шоттковской эмиссии в низкопольной области вольт-амперных характеристик и улучшает их основные параметры;

7) экспериментально подтверждено, что использование инертных электродов из нитрида титана (TiN) в мемристорных структурах $TiN/HfO_2/TiN$ исключает электрохимический механизм (ЕСМ) переключения и обеспечивает стабильный VCM-механизм с биполярной полярностью и отношением сопротивлений $R_{off}/R_{on} \approx 10$.

Таким образом, научная новизна работы заключается в комплексном подходе к разработке и исследованию мемристорных элементов памяти, а также в установлении корреляционных связей между технологическими параметрами реактивного магнетронного распыления, структурно-морфологическими свойствами и электрическими параметрами мемристорных элементов памяти на основе тонких диэлектрических слоев ZrO_2 и HfO_2 .

Практическая значимость работы

1) оптимизированы параметры осаждения тонких диэлектрических пленок ZrO_2 и HfO_2 с использованием магнетронного распыления: мощности разряда (300 Вт), расхода кислорода для $ZrO_2 = 9 \text{ см}^3/\text{мин}$ для $ZrO_2 = 11 \text{ см}^3/\text{мин}$ и давления 0,2 Па, что позволило получить пленки с высокой однородностью, низкой шероховатостью и заданным стехиометрическим составом;

2) созданы экспериментальные образцы мемристоров с симметричными электродами из TiN и вспомогательными слоями W, обладающие отношением сопротивлений R_{off}/R_{on} для оксида

циркония более 16 и для оксида гафния не менее 10. Полученные результаты подтверждают возможность использования данных структур для создания энергонезависимой памяти нового поколения, с параметрами, конкурентными по отношению к традиционным Flash- и DRAM-технологиям;

3) установлено влияние морфологии и элементного состава пленок на характеристики мемристоров. Комплексный анализ методами АСМ, СЭМ, EDS и ИК-спектроскопии позволил выявить корреляцию между структурой пленок и их электрофизическими свойствами. Это дает возможность целенаправленно модифицировать материалы для улучшения параметров элементов памяти;

4) достигнуто отношение сопротивлений $R_{off}/R_{on} = 16,45$ для структур $\text{TiN}/\text{Ti}/\text{ZrO}_2/\text{W}$, что создает перспективы практической реализации в качестве основы для создания энергонезависимых мемристоров.

Разработанные технологические основы могут найти широкое практическое применение при разработке и изготовлении многофункциональных тонкопленочных устройств на основе структур металл-диэлектрик-металл.

Теоретическая значимость работы состоит в получении новых фундаментальных знаний о взаимосвязях между составом, структурой, морфологией и свойствами мемристорных устройств. В ходе исследования было установлено ключевое влияние морфологии и элементного состава тонких пленок на электрофизические характеристики мемристоров. Комплексный анализ методами АСМ, СЭМ, EDS и ИК-спектроскопии позволил выявить и обосновать корреляцию между микроструктурой пленок и их функциональными свойствами. Это углубляет понимание физических механизмов, лежащих в основе работы мемристорных структур на основе оксидных диэлектриков, и представляет научную основу для целенаправленной модификации материалов с целью прогнозируемого улучшения параметров мемристорной памяти.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Формирование ультрамелких кристаллических областей размером порядка 1–2 нм, заключенных в аморфной матрице пленок ZrO_2 , полученных методом магнетронного распыления в

режиме полного окисления мишени, обеспечивает наилучшее соотношение сопротивлений $R_{off}/R_{on} = 16,45$ и снижение количества локальных пробоев, что определяет воспроизводимость ВАХ мемристоров в режиме переключения.

2 Уменьшение шероховатости пленок ZrO_2 менее 1 нм путем подбора оптимальной скорости осаждения способствует более равномерному распределению электрического поля на границе раздела «электрод – активный слой», что увеличивает вклад шоттковской эмиссии в низкопольной области ВАХ и улучшает воспроизводимость ВАХ в режиме переключения.

3. Мемристорные структуры $TiN/HfO_2/TiN$, изготовленные с применением Т-образной топологии верхнего электрода на основе TiN , исключают электрохимический механизм (ЕСМ) и обеспечивают надежный VCM-механизм переключения с биполярной полярностью и соотношением сопротивлений R_{off}/R_{on} порядка 10.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным теоретическим обоснованием, базирующимся на известных моделях резистивного переключения в тонкоплёночных структурах металл-диэлектрик-металл, а также согласованностью полученных экспериментальных данных с результатами, опубликованными в современной научной литературе по мемристорным структурам.

Надёжность выводов подтверждается применением стандартных методов экспериментальных исследований с использованием современной измерительной аппаратуры. Полученные закономерности устойчиво воспроизводятся на различных сериях образцов, что подтверждается статистической значимостью результатов и исключает их случайный характер.

Основные положения диссертации прошли апробацию на представительных международных и всероссийских научных конференциях, а результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, что позволяет научному сообществу верифицировать сделанные выводы. Совокупность перечисленных факторов свидетельствует о высокой степени достоверности проведённых исследований.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-практических конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (МНПК ЭСиСУ-2022). – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2022.

2. XXVII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР – 2022», посвящённая 60-летию ТУСУРа. – Томск, 2022.

3. II Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы науки и техники», посвященная 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». – Сарапул: УИР ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2022.

4. Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022.

5. 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM).

6. XX Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР – 2025», 21–23 мая 2025 г. – Томск, 2025.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований по разработке и изучению мемристорных структур на основе тонких пленок оксидов циркония и гафния. На всех этапах работы результаты исследований обсуждались с научным руководителем Ю.В. Сахаровым, д-ром техн. наук, заведующим кафедрой физической электроники, и П.Е. Трояном, д-ром техн. наук, профессором кафедры физической электроники, которые оказывали методическую помощь и участвовали в обсуждении научных результатов.

Автором разработаны мемристорные структуры с симметричными электродами из TiN и вспомогательными слоями на основе вольфрама W. Мемристоры выполнены в рамках академического партнёрства в лаборатории наноматериалов и наноэлектроники на базе Технологического парка ФГАОУ ВО

«Тюменский государственный университет» совместно с младшим научным сотрудником Н.А. Шулаевым. Исследование структурно-морфологических особенностей, фазового состава, оптических параметров, частотных характеристик и элементного анализа характеристик разработанных структур проведено в лабораториях ТУСУР совместно с мл. нач. сотр. А. Уразбековым.

Автором лично проведен анализ полученных результатов, включая обработку экспериментальных данных, выявление закономерностей и формулировку научных выводов. Все ключевые положения и заключения диссертационной работы основаны на личных исследованиях автора.

Автор принимал участие в качестве исполнителя, в реализации проекта «Разработка механизма переключения и технологии изготовления элемента памяти мемристорного типа» в 2023 году коллективом кафедры физической электроники ТУСУР в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Публикации. На основе материалов диссертации были опубликованы 9 научных работ. Среди них 2 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций по специальности 1.3.5 «Физическая электроника», 1 статья в рецензируемом журнале по специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» и 6 работ в сборниках материалов всероссийских и международных конференций. Заявка на получение патента на изобретение, прошла все необходимые экспертизы и находится на стадии публикации.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, 4 главы, заключение и список литературы. Объем работы составляет 138 страниц, 46 рисунков, 6 формул, 16 таблиц, список из 125 наименований источников и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана оценка актуальности диссертационной работы на основе аналитического обзора, сформулированы цель и задачи работы, а также приведены научные положения, выносимые на

защиту. Определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложены структура и содержание диссертационной работы.

Первая глава представляет собой комплексный литературный обзор мемристорных элементов памяти, в том числе реализованных на основе тонких пленок диоксида гафния (HfO_2) и диоксида циркония (ZrO_2). Рассмотрены физические принципы их работы, ключевые характеристики и современное состояние исследований. Основное внимание уделено резистивному переключению (ReRAM) в структурах металл-диэлектрик-металл, которое обусловлено формированием и разрывом проводящих филаментов под действием электрического поля. На основе комплексного анализа электрических характеристик и совместимости технологии формирования проводится обоснование выбора материалов HfO_2 и ZrO_2 , используемых в качестве активных слоев мемристорных структур.

Мемристоры на основе активных слоев из HfO_2 и ZrO_2 представлены как основа для создания нового поколения энергонезависимой памяти, превосходящей по быстродействию и энергоэффективности традиционные Flash- и DRAM-технологии, и как ключевой компонент для разработки нейроморфных вычислительных систем.

Вторая глава посвящена методикам подготовки экспериментальных образцов и проведению исследований. В начале рассматриваются методы очистки поверхности подложек перед напылением, приведены режимы очистки для кремниевых и стеклянных подложек. Подчеркивается важность качества очистки для обеспечения адгезии и равномерности наносимых покрытий.

В разделе приведено обоснование выбора материалов для создания мемристорных структур, включая материалы подложки, нижнего и верхнего электродов, также описано оборудование для напыления и травления поверхностей: модуль магнетронного напыления комплекса «НаноФаб-100» и модуль «Плазма» химического травления. Также приводится описание методик комплексного исследования структуры полученных функциональных слоев с использованием сканирующей электронной микроскопии, зондовой микроскопии, микроинтерферометрии, спектрометрии и рентгенофазового

анализа. Приведена методика исследования электрических характеристик мемристорных структур и описано использованное оборудование.

В третьей главе проведено комплексное исследование мемристорных элементов памяти на основе тонких плёнок диоксида циркония (ZrO_2). Разработана структура элемента с использованием кроссбарной структуры, обеспечивающей высокую плотность компоновки, энергоэффективность и совместимость с современными технологическими процессами.

Исследование проводилось на мемристорных элементах на основе $\text{W-ZrO}_2\text{-Ti-TiN}$. На одной подложке формировалось по шесть мемристоров каждый из которых соответствовал одному из выбранных режимов осаждения активного слоя (таблица 1).

Таблица 1 – Режимы осаждения стехиометричных пленок ZrO_2

Режим	P , Па	Ток разряда, А	Скорость нанесения, нм/с	Расход газа $Q(\text{O}_2)$, $\text{см}^3/\text{мин}$
1	0,15	0,3	0,1	6
2	0,15	0,6	0,21	11
3	0,15	1	0,33	18

Разработанная мемристорная структура представлена на рисунке 1. Она представляет собой многослойную систему, сформированную последовательным осаждением функциональных слоёв на подложку. Конструкция включает три ключевых функциональных слоя, каждый из которых выполняет специфическую роль в работе устройства. Нижний электрод шириной 1 мкм и толщиной 30 нм сформирован из вольфрама. В качестве активного слоя выступал диоксид циркония толщиной 15 нм,. Верхний электрод выполнялся комбинированным: 30 нм титана — для создания надежного омического контакта, и 20 нм нитрида титана, выполняющего роль защитного барьера от окисления и деградацию электрода в процессе эксплуатации. Такая двухслойная конструкция верхнего электрода гарантирует долговременную стабильность работы всего устройства. Контактные площадки имеют размер 40×40 мкм.

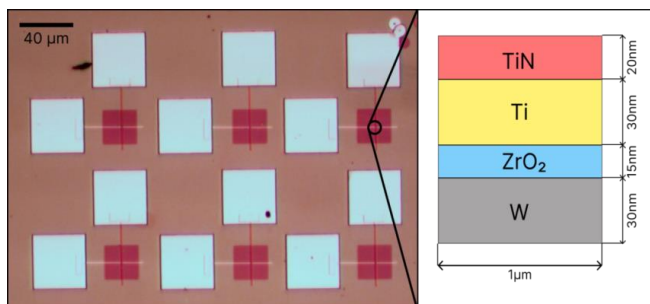


Рисунок 1 – Микрофотография набора образцов и схема поперечного сечения мемристора

Для метода реактивного магнетронного распыления определены оптимальные режимы осаждения стехиометрических плёнок ZrO_2 . Установлено, что для стабилизации скорости осаждения на уровне $\sim 0,21$ нм/с необходим расход кислорода ≥ 9 см³/мин. Выделены три характерных режима осаждения: металлический, переходный и оксидный. (рисунок 2).

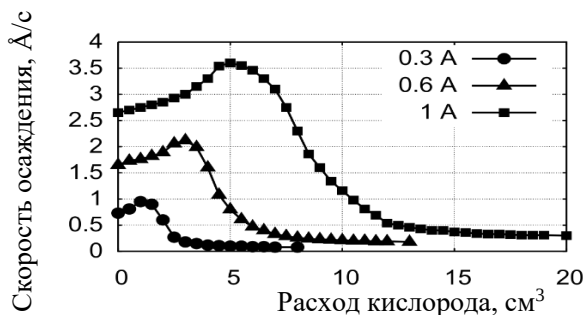


Рисунок 2 – Зависимость скорости осаждения плёнок ZrO_2 от расхода кислорода при разных токах разряда

Для определения стехиометрического состава плёнок ZrO_2 , методом EDS (energy dispersion spectrometry) были проанализированы контрольные плёнки большей толщины. Во всех трёх режимах соотношение O/Zr оказалось близким к 2, с погрешностью в пределах метода, что подтверждается данными таблицы 2.

Таблица 2 – Содержание элементов (EDS) в пленках, изготовленных в разных режимах

Режим	$R, \text{\AA}/\text{с}$	O, at%	Zr, at%	C(O/Zr)
1	0,1	63,9	31,5	2,03
2	0,21	63,7	32,2	1,98
3	0,33	65,2	32,1	2,03

Стехиометрия оксидного активного слоя мемристора определяет концентрацию кислородных вакансий, которые являются основными носителями заряда и обеспечивают механизм резистивного переключения, поэтому отклонение от стехиометрического состава приводит к нестабильности параметров, снижению соотношения сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях ($R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$) и ухудшению воспроизводимости характеристик.

Морфология поверхности активного слоя влияет на работу мемристора. Тонкие плёнки ZrO_2 толщиной 15 нм исследованы методом атомно-силовой микроскопии с помощью сканирующего зондового микроскопа «ИНТЕГРА-АУРА», предварительно измерялась шероховатость исходной подложки SiO_2 . Измерение тонкой пленки происходило с учётом вычитания шероховатости подложки. Изображения АСМ для трех режимов представлены на рисунке 3. Светлые области — выступы, тёмные — впадины. Изменение размера зёрен связано с балансом между подвижностью адсорбированных атомов и скоростью осаждения.

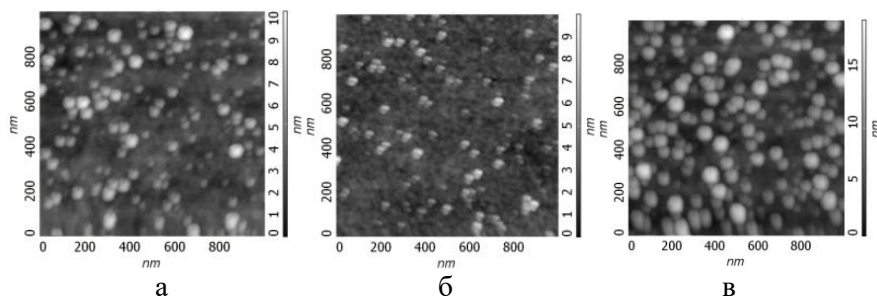


Рисунок 3 – Изображения АСМ-поверхности пленок ZrO_2 , изготовленных при первом (а), втором (б) и третьем (в) режимах

Режим 2 обеспечивает минимальную среди исследованных режимов шероховатость: атомы заполняют поверхность без образования крупных агломератов, что соответствует наименьшему размеру зёрен. Средняя шероховатость имеет локальный минимум для второго режима со скоростью осаждения 0,21 Å/с. Для этого образца средняя шероховатость составляет 0,95 нм (таблица 3, рисунок 3).

Таблица 3 – Результаты АСМ-измерений

Режим	Средняя шероховатость, нм	Корреляционная длина, нм
1	1,22	30,05
2	0,95	23,49
3	2,43	33,44

Увеличение шероховатости поверхности плёнки относительно подложки на величину порядка 1 нм не является критическим фактором деградации, а напротив, в определённых пределах способствует формированию структуры с воспроизводимыми характеристиками. Достигнутое значение шероховатости обеспечивает достаточную однородность активного слоя по толщине и морфологии, что, в свою очередь, создаёт предпосылки для более равномерного распределения электрического поля в объёме диэлектрика при приложении напряжения. Данное обстоятельство имеет принципиальное значение для мемристорных структур, поскольку локальные неоднородности поля могут приводить к неконтролируемому зарождению проводящих каналов.

Результаты рентгенофазового анализа подтверждают, что плёнка ZrO_2 обладает нанокомпозитной структурой: кристаллиты тетрагональной/кубической фазы равномерно распределены в аморфной матрице. Подобная архитектура в сочетании с низкой шероховатостью поверхности (менее 1 нм) представляется оптимальной для активного слоя мемристора. Аморфная матрица обеспечивает высокую гладкость поверхности и подавляет паразитные токи утечки, поскольку в ней отсутствуют протяжённые границы зёрен, которые могли бы служить шунтирующими путями. В то же время нанокристаллиты выполняют функцию локализованных центров усиления

электрического поля, что способствует контролируемому зарождению и росту токопроводящих филаментов в заданных областях, снижая стохастичность процесса переключения. При этом важно, что данный эффект достигается именно при равномерном распределении кристаллитов и умеренной их плотности; избыточная кристаллизация или кластеризация частиц может, напротив, увеличить токи утечки и ухудшить стабильность высокоомного состояния.

Таким образом, совокупность полученных структурных и морфологических данных позволяет заключить, что сформированная плёнка ZrO_2 соответствует требованиям, предъявляемым к активному слою мемристора (рисунок 4).

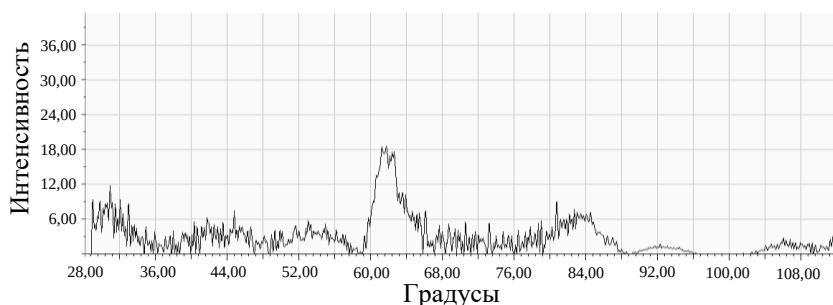


Рисунок 4 – Дифрактограмма кристаллической структуры тонкой пленки диоксида циркония

Исследование морфологии поверхности пленок ZrO_2 проводилось на атомно-силовом микроскопе. Результаты представлены для двух образцов с толщиной 10 нм и 250 нм. Установлено, что плёнки толщиной 10 нм демонстрируют значительно меньшую шероховатость 0,537 нм по сравнению с образцами толщиной 250 нм, для которых это значение составило порядка 2,8 нм. Более низкая шероховатость обеспечивает контролируемое формирование проводящих нитей и меньший разброс пороговых напряжений.

Для доказательства того, что увеличение шероховатости диэлектрического слоя мемристора толщиной более 10 нм приводит к появлению областей с высокой локальной напряжённостью поля,

были проведены исследования на МДМ-структурах с алюминиевыми электродами и диэлектрическими плёнками SiO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , ZnO_2 , HfO_2 . В ходе экспериментов было выявлено, что наблюдаемые процессы были идентичны для различных диэлектриков, поэтому дальнейшие результаты описаны только для одной структуры $\text{Al-SiO}_2\text{-Al}$. Диэлектрические плёнки были получены магнетронным распылением мишени в смеси газов $\text{Ar}+\text{O}_2$. Electrodes были нанесены на стеклянную подложку или сапфир термическим испарением алюминия в вакууме $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. В ряде случаев нижний электрод был получен путём магнетронного распыления алюминиевой мишени в среде аргона.

На рисунке 5 можно отметить, что минимальные значения коэффициента усиления поля, а, следовательно, и максимальная электрическая прочность наблюдаются для различных параметров микроострий в определённых диапазонах толщин. Так, для $h = 20$ нм этот диапазон лежит в пределах d от 25 до 30 нм, при $h = 30$ нм — от 50 до 60 нм, при $h = 40$ нм — от 55 до 65 нм, при $h = 45$ нм — от 75 до 85 нм.

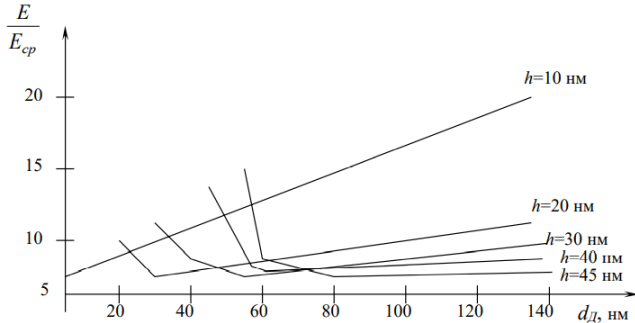


Рисунок 5 – Расчетные данные отношения электрических полей $E_{\text{ср}}/E$ от толщины диэлектрика для различных высот микроострий на нижнем электроде

Сравнительный анализ показал, что для мемристорных применений предпочтительны более тонкие плёнки толщиной 10–20 нм, тогда как весь диапазон толщин активного диэлектрика может составлять от 10 до 250 нм. Нижняя граница обусловлена требованием к сплошности пленки (при толщине диэлектрика

менее 10 нм формируется значительное количество закороченных МДМ-структур). Верхняя граница ограничена необходимостью локальности электрического поля (при толщинах более 250 нм напряжённость электрического поля ставится однородной и более вероятным становится процесс электрического пробоя МДМ-структуры). Для мемристорных применений требуется минимальный коэффициент усиления электрического поля. На рисунке 6 представлена зависимость $E_{пр} = f(d_o)$, иллюстрирующая изложенные выше утверждения. В результате можно отметить, что применение тонких плёнок диэлектриков (на уровне 10–20 нм) не снижает предельного допустимого напряжения работы мемристорного элемента на основе МДМ-структур.

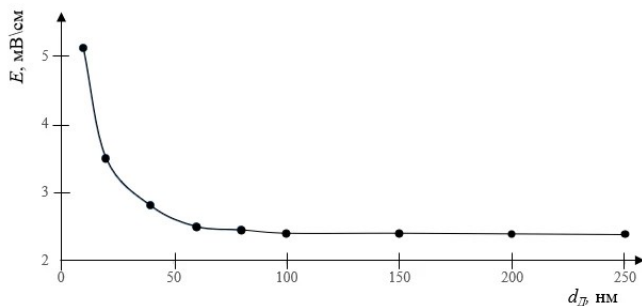


Рисунок 6 – Зависимости электрической прочности диэлектрика SiO_2 от толщины $E_{пр} = f(d_o)$

На рисунке 7 представлены результаты исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) мемристоров, изготовленных на основе тонких плёнок диоксида циркония (ZrO_2) с различной морфологией поверхности. На рисунке можно отметить значительные различия ВАХ мемристоров, изготовленных в трёх различных режимах осаждения. Отношение R_{off}/R_{on} составило: 2,19 — для образца, изготовленного в первом режиме; 16,45 — для образца во втором режиме; 4,16 — для образца в третьем режиме. Максимальное значение отношения R_{off}/R_{on} зафиксировано для образца, изготовленного во втором режиме. Полученные результаты свидетельствуют о наличии локального максимума в зависимости отношения R_{off}/R_{on} от скорости осаждения.

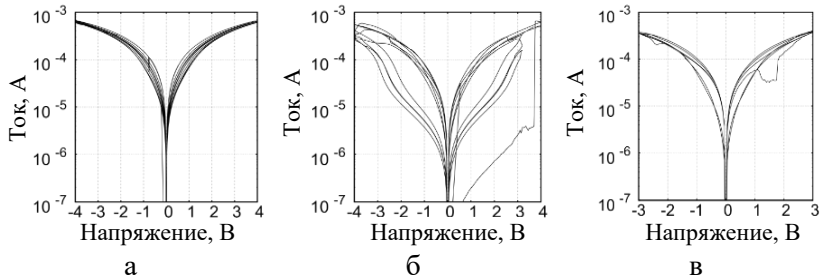


Рисунок 7 – Вольт-амперные характеристики мемристоров на основе $W-ZrO_2-Ti-TiN$ с активными слоями, изготовленными в первом (а), втором (б) и третьем (в) режимах

Анализ ВАХ показал, что для образца ZrO_2 , полученного во втором режиме осаждения ($Ra = 0,95$ нм), в диапазоне напряжений 0,05–1,00 В наблюдается наилучшее соответствие шоттковской модели ($Ra = 0,95$), тогда как для образцов первого и третьего режимов коэффициенты детерминации существенно ниже ($Ra = 0,58$ и $0,67$ соответственно). Показано, что уменьшение шероховатости плёнок ZrO_2 ниже 1 нм способствует более равномерному распределению электрического поля на границе раздела «электрод – активный слой», что увеличивает вклад шоттковской эмиссии в низкопольной области ВАХ и коррелирует с максимальным отношением $R_{off}/R_{on} = 16,45$.

Таким образом, проведённые исследования позволили разработать технологию получения тонких плёнок ZrO_2 с контролируемыми свойствами и установить закономерности между параметрами осаждения, морфологией и электрофизическими характеристиками.

В четвёртой главе описано проведение комплексного исследования мемристорных элементов памяти на основе тонких плёнок диоксида гафния (HfO_2). Разработана и реализована технология изготовления мемристоров с симметричной структурой $TiN/HfO_2/TiN$, использующая Т-образную топологию верхнего электрода. В процессе разработки мемристоров была выявлена типичная проблема, характерная для планарной технологии. При осаждении слоев через маску или при использовании литографии

функциональные пленки частично осаждаются на стенки маски. В результате по краям нижнего электрода формируются области со сниженной толщиной активного диэлектрика, а также возникают неконтролируемые дефекты в виде так называемых «ребер». Эти периферийные области становятся слабым местом структуры: именно здесь при подаче напряжения возникает неконтролируемый пробой, выводящий устройство из строя. Экспериментальное подтверждение проблемы краевого пробоя приведено на рисунке 8а.

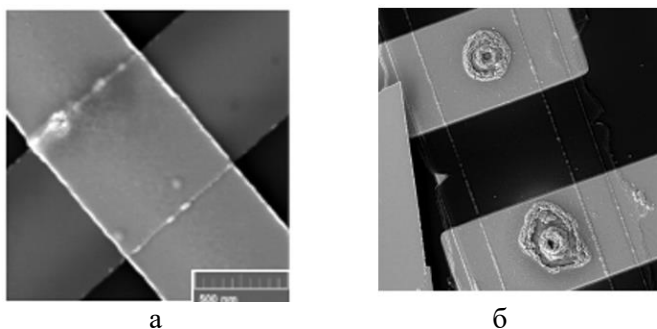


Рисунок 8 – Электрический пробой мемристора на основе $W-ZrO_2-Ti-TiN$:

а – в периферийной части слоев; б – со сформированным дополнительным кольцевым слоем защитного диэлектрика при воздействии повышенного электрического поля

На рисунке 8б представлена микрофотография мемристора с защитным кольцевым слоем после воздействия повышенного электрического поля. При наличии защитного кольцевого слоя пробой локализован в центральной области активного слоя; в структурах без защитного слоя пробой развивался по периферии, что связано с особенностями осаждения. Защитный диэлектрик надежно экранирует периферию, и разрушение происходит именно в рабочей зоне мемристора, а не по периферии электрода.

Технология мемристорной структуры типа $TiN/HfO_2/TiN$ с Т-топологией представлена на рисунке 9. Данная реализация заключается в формировании дополнительного кольцевого слоя защитного диэлектрика: после осаждения активного слоя HfO_2 вдоль его периферии, с наложением на активный слой и нижний

электрод, осаждается слой диоксида кремния. Этот слой компенсирует уменьшение толщины активного диэлектрика на краях и закрывает периферийные дефекты нижнего электрода в виде рёбер.

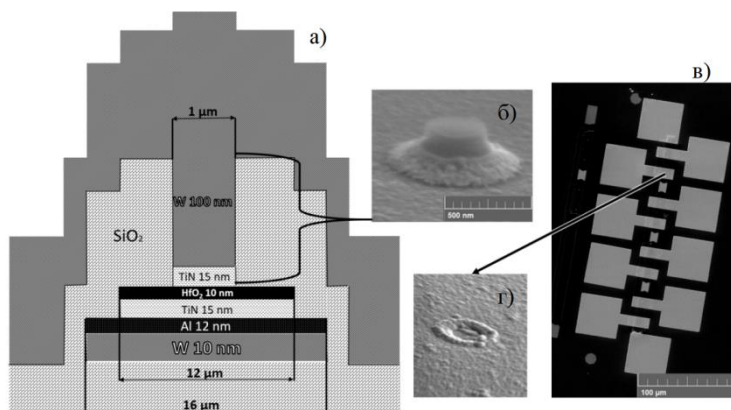


Рисунок 9 – Схема поперечного сечения мемристоров TiN/HfO₂/TiN с Т-топологией (а); мемристор до нанесения верхнего электрода и изолятора (б); топология мемристормного кроссбара (в); мемристор под верхним электродом (г)

Технологический процесс реализуется в несколько этапов. Нижние электроды формируются через первую маску. Через новую маску осаждается мемристормная структура TiN/HfO₂/TiN со вспомогательным слоем вольфрама. Далее формируется окно и проводится плазмохимическое травление, удаляющее вспомогательные слои. Важно, что все плёнки осаждаются ступенчато, что обеспечивает достаточную толщину изолятора SiO₂ (100 нм) и верхнего электрода (W, 100 нм) на всём протяжении, снижая риск пробоя по периферии.

Также комплексно исследовалась плёнка диоксида гафния HfO₂. По данным EDS, 250-нм плёнки HfO₂ имеют стехиометрическое соотношение O/Hf ≈ 2 и не содержат значимых примесей, что обеспечивает воспроизводимость характеристик мемристоров.

Дифрактограмма плёнки HfO₂ свидетельствует о нанокompозитной структуре, где кристаллиты тетрагональной/кубической фазы распределены в аморфной

матрице. При низкой шероховатости (менее 1 нм) аморфная фаза обеспечивает гладкость поверхности и минимизирует токи утечки, а нанокристаллиты служат центрами формирования стабильных токопроводящих каналов. Такое строение обеспечивает формирование надёжного мемристора (рисунок 10).

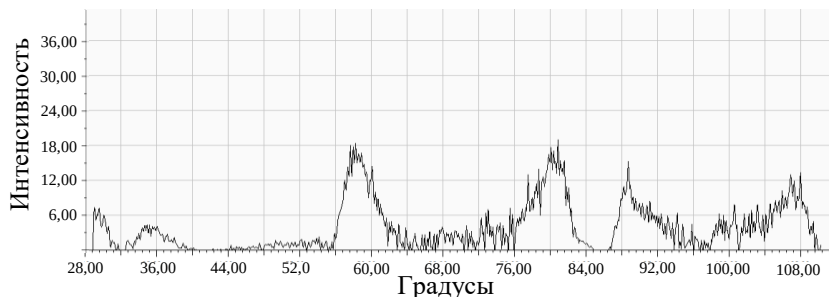


Рисунок 10 – Дифрактограмма тонкой пленки HfO_2 полученной методом магнетронного распыления

Методом атомно-силовой микроскопии установлена прямая связь между топографией поверхности и функциональными параметрами мемристоров. Показано, что при толщине плёнки 10 нм шероховатость R_a составляет 0,37 нм, тогда как для образцов толщиной 250 нм значение R_a возрастает до 2,09 нм. Меньшая шероховатость способствует более детерминированному формированию токопроводящих филаментов и снижает вариабельность пороговых напряжений.

Энергодисперсионная спектроскопия подтвердила стехиометрический состав плёнок HfO_2 ($\text{O}/\text{Hf} \approx 2$) и отсутствие значимых примесей (менее 0,1 ат.%), что является критически важным для воспроизводимости характеристик мемристоров.

Исследование вольт-амперных характеристик мемристорных структур $\text{TiN}/\text{HfO}_2/\text{TiN}$ выявило четко выраженный гистерезис с отношением сопротивлений $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} \approx 10$, что достаточно для стабильного различения логических состояний (рисунок 11).

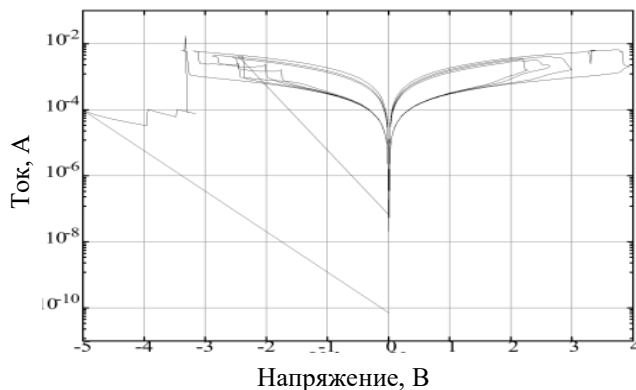


Рисунок 11 – Вольт-амперные характеристики мемристора на основе структуры $\text{TiN}/\text{HfO}_2/\text{TiN}$

Таким образом, проведённые исследования позволили разработать технологию получения мемристоров на основе HfO_2 с контролируемыми свойствами и установить оптимальные параметры, обеспечивающие высокое качество плёнок и воспроизводимость характеристик.

Основные результаты и выводы

1. **Разработана технология получения тонких стехиометрических плёнок ZrO_2 и HfO_2 методом реактивного магнетронного распыления.** Определены оптимальные режимы осаждения: для ZrO_2 – скорость осаждения 0,21 нм/с, расход кислорода 11 см³/мин, ток разряда 0,6 А, давление 0,15 Па (режим 2); для HfO_2 – аналогичные условия, обеспечивающие стехиометрический состав ($\text{O}/\text{Zr} \approx 2$, $\text{O}/\text{Hf} \approx 2$) и шероховатость поверхности менее 1 нм. Показано, что осаждение в оксидном режиме с полным окислением мишени является ключевым фактором получения плёнок с низкой концентрацией кислородных вакансий и высокой воспроизводимостью свойств.

2. **Установлены закономерности влияния режимов осаждения на морфологию и микроструктуру плёнок.** Методом атомно-силовой микроскопии показано, что наименьшая средняя шероховатость (0,95 нм для ZrO_2 и 0,37 нм для HfO_2 при толщине

10 нм) достигается при оптимальной скорости осаждения ($\approx 0,21$ нм/с). Увеличение скорости до 0,33 нм/с приводит к росту шероховатости до 2,43 нм и ухудшению однородности. Рентгенофазовый анализ выявил нанокompозитную структуру: кристаллиты тетрагональной/кубической фазы (размером 5–10 нм) равномерно распределены в аморфной матрице, такая структура обеспечивает формирование стабильных проводящих филаментов.

3. Проведено комплексное исследование электрофизических свойств мемристорных структур на основе ZrO_2 и HfO_2 . Для структур $\text{TiN}/\text{ZrO}_2/\text{TiN}$ получены типичные гистерезисные вольт-амперные характеристики с отношением сопротивлений $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ до 16,45 (для режима 2). Для структур $\text{TiN}/\text{HfO}_2/\text{TiN}$ отношение $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ составило ≈ 10 , что достаточно для стабильного различения логических состояний. Установлено, что важным параметром, определяющим величину $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$, является шероховатость поверхности диэлектрического слоя: минимальная шероховатость (0,95 нм) соответствует максимальному отношению сопротивлений.

4. Предложена и экспериментально реализована новая конструкция мемристора с кольцевым защитным диэлектрическим слоем. Для устранения неконтролируемого электрического пробоя по периферии электродов (вызванного утонением активного слоя и краевыми дефектами) в структуру введён дополнительный слой SiO_2 , осаждённый вдоль периферийной части мемристора с частичным наложением на активный диэлектрик и нижний электрод. Показано, что такая топология (Т-образная) позволяет компенсировать снижение толщины на краях и закрыть дефекты («рёбра») нижнего электрода, что повышает предельное пробивное напряжение и надёжность мемристора. Микрофотографии подтверждают локализацию пробоя в центральной рабочей области, а не по краю электрода.

5. Экспериментально подтверждена взаимосвязь между толщиной диэлектрического слоя, шероховатостью электродов и электрической прочностью МДМ-структур. На основе модели усиления электрического поля на микроострых поверхностях электродов показано, что для плёнок толщиной 10–20 нм коэффициент усиления поля минимален, а электрическая прочность остаётся высокой. Диапазон толщин 10–100 нм определён как

рабочий для мемристорных применений: при толщине менее 10 нм возрастает число закороченных структур, при толщине более 100 нм снижается напряжённость поля.

6. Экспериментально установлена корреляция между шероховатостью диэлектрического слоя и отношением R_{off}/R_{on} . На примере плёнок ZrO_2 показано, что наименьшая шероховатость (0,95 нм) обеспечивает максимальное отношение сопротивлений (16,45). Увеличение шероховатости до 1,22 нм снижает отношение до 2,19, а до 2,43 нм – до 4,16. Таким образом, для достижения высокого R_{off}/R_{on} необходимо формировать диэлектрические слои с минимальной шероховатостью, что достигается выбором оптимального режима магнетронного распыления.

7. Разработана и апробирована полная технологическая схема изготовления мемристорных элементов памяти на основе ZrO_2 и HfO_2 . Предусматривает очистку подложек, формирование нижних электродов (W, TiN) через маску, осаждение активного слоя (ZrO_2 или HfO_2) методом реактивного магнетронного распыления в оптимальных режимах, нанесение кольцевого защитного слоя SiO_2 , формирование верхних электродов (TiN/W) с Т-образной топологией. Созданы экспериментальные образцы мемристоров с кроссбарной структурой, совместимые с КМОП-технологией.

Перечень публикаций по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science

1. Уразбеков А. Е. Применение ультразвуковых колебаний для исследования электрофизических свойств мемристоров на основе оксида меди / А. Е. Уразбеков, П. Е. Троян, М. А. Свириденко // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2025. – № 1(276). – С. 47–51. – DOI 10.36845/2073-8250-2025-276-1-47-51.

2. Новый способ увеличения параметра мемристора R_{off}/R_{on} на примере тонкопленочной структуры на основе оксида титана / А. Е. Уразбеков, П. Е. Троян, Ю. В. Сахаров, М. А. Свириденко //

Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51, вып. 12. – С. 43–45. – DOI 10.61011/PJTF.2025.12.60613.20267.

Прочие публикации в рецензируемых журналах

3. Троян П. Е. Влияние микрорельефа электрода и толщины диэлектрика на электрическую прочность и напряженность электрического поля формовки тонкопленочных структур металл-диэлектрик-металл / П. Е. Троян, М. А. Свириденко // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 22–28. – DOI 10.18127/j22250980-202302-02.

Публикации в сборниках трудов и материалы конференций

4. Influence of Fabrication Modes on Magnetron-Sputtered ZrO_2 -Based Memristors' Properties / A. N. Bobylev, A. A. Gubin, **M. A. Sviridenko**, N. A. Shulaev, S. Yu. Udovichenko // 2024 IEEE Conference on Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – 2024. – P. 823–826.

5. Разработка и исследование мемристоров на основе оксида гафния с Т-образной топологией / М. А. Свириденко, Р. Ж. Касеинов, В. Кирнев [и др.] // XX Научная сессия ТУСУР – 2025 : Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – 2025. – С. 234–237.

6. Свириденко М. А. Современные тенденции в мире мемристоров / М. А. Свириденко // Научная сессия ТУСУР – 2022 : Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск, 2022. – С. 207–211.

7. Стрелкова А. Е. Исследование зависимости площади разрушения верхнего электрода от энергии пробоя тонкопленочного конденсатора / А. Е. Стрелкова, Ю. В. Сахаров, М. А. Свириденко // Актуальные проблемы науки и техники : II Междунар. науч.-техн. конф., посвященная 70-летию ИМИ-ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», 19–21 мая 2022 г. – Сарапул, 2022. – С. 667–671.

8. Стрелкова А. Е. Уточнение формулы для расчета радиуса канала пробоя верхнего электрода тонкопленочного конденсатора

(ТПК) / А. Е. Стрелкова, Ю. В. Сахаров, М. А. Свириденко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук. – Белгород : БГТУ, 2022. – Ч. 20. – С. 253–258.

9. Троян П. Е. Влияние микрорельефа электрода и толщины диэлектрика на электрическую прочность и напряженность электрического поля формовки тонкопленочных структур металл-диэлектрик-металл / П. Е. Троян, М. А. Свириденко // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф. – 2022. – № 1-1. – С. 60–62.

Результаты интеллектуальной деятельности

10. Заявка на изобретение № 2026101697 Российская Федерация. Мемристор с повышенной надежностью: от 27.01.26 г. (на рассмотрении).