



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
и инновациям ТУСУР

Куксенко С.П.

15 » апреля 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Томский государственный университет систем
управления и радиозлектроники» (ТУСУР)

Диссертация «Технология получения и исследование электрофизических свойств тонких пленок оксидов металлов для создания мемристорных элементов памяти» выполнена на кафедре физической электроники ТУСУР.

В период подготовки диссертации соискатель Свириденко Мария Андреевна работала на кафедре физической электроники ТУСУР в должности ассистента; обучалась в очной аспирантуре ТУСУР.

В 2019 г. М. А. Свириденко окончила обучение по магистерской программе подготовки «11.04.04 Электроника и нанoeлектроника», профиль «Твердотельная электроника» ТУСУР.

Научный руководитель — Сахаров Юрий Владимирович, доктор технических наук, заведующий кафедры физической электроники.

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Свириденко М.А. является научно-квалификационной работой, в которой приведена технология получения тонких пленок ZrO_2 и HfO_2 и исследование их электрических свойств. Проведённые исследования позволили установить влияние свойств материалов мемристоров на характер физических процессов в мемристорных устройствах и создать образцы мемристорных элементов памяти на основе данных пленок.

Актуальность темы и направленность исследования

Дальнейшее уменьшение топологических норм традиционных типов памяти (DRAM, Flash) наталкивается на фундаментальные физические ограничения, проявляющиеся 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.

Мемристорные структуры обладают высоким быстродействием, низким энергопотреблением и потенциально высокой плотностью интеграции, что позволяет использовать их не только как ячейки резистивной памяти (ReRAM), но и для реализации нейроморфных вычислений (благодаря аналоговой модуляции проводимости) и архитектур «вычислений в памяти», преодолевающих узкое место фон-неймановской архитектуры. Однако широкому практическому применению мемристоров препятствуют два основных недостатка: во-первых, значительный разброс сопротивления и напряжений переключения от цикла к циклу и от элемента к элементу (нестабильность параметров), а во-вторых, малое количество циклов перезаписи, которое выдерживает типичный образец до разрушения (ограниченная долговечность).

Среди диэлектрических материалов для активного слоя мемристоров особый интерес вызывают оксид гафния (HfO_2) и оксид циркония (ZrO_2) благодаря высокой диэлектрической проницаемости, термической и химической стабильности, способности к обратимому формированию проводящих филаментов под действием электрического поля, а также совместимости с кремниевой технологией. Таким образом, разработка и исследование мемристорных структур на основе HfO_2 и ZrO_2 является актуальной задачей, направленной на создание элементной базы для энергонезависимой памяти и вычислительных систем нового

поколения.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

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.т.н., заведующим кафедры физической электроники и П.Е. Трояном, д.т.н., профессором кафедры физической электроники, которые оказывали методическую помощь, а также консультативную поддержку.

Автором разработаны мемристорные структуры с симметричными электродами из TiN и вспомогательными слоями 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 (по данным дифрактограмм), оптических параметров (показатель преломления, ИК-спектроскопия), частотных характеристик и элементного анализа характеристик разработанных структур проведено в лабораториях ТУСУР совместно с младшим научным сотрудником 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 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 -

Степень достоверности результатов проведённых исследований

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.

Новизна результатов проведенных исследований

1. определены оптимальные условия формирования стехиометрических плёнок ZrO_2 с шероховатостью менее 1 нм методом реактивного магнетронного распыления: скорость осаждения 0.2 Å/с, расход кислорода 9 см³/мин, ток разряда 0.6 А, давление 0.15 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 $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} = 16.45$ для мемристоров на основе ZrO_2 ;

5. установлена количественная взаимосвязь между шероховатостью диэлектрического слоя мемристора и отношением сопротивлений $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$: увеличение шероховатости свыше 1 нм приводит к снижению $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ 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 $\text{TiN}/\text{HfO}_2/\text{TiN}$ исключает электрохимический механизм (ECM) переключения и обеспечивает стабильный VCM-механизм с биполярной полярностью и отношением сопротивлений $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} \approx 10$.

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 диссертации и использование полученных результатов

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 TiN/Ti/ ZrO_2 /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 multifunctional тонкопленочных устройств на основе структур металл-диэлектрик-металл.

Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах

На основе материалов диссертации было опубликовано 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 и 6 работ в сборниках материалов всероссийских и международных конференций

Статьи в журналах из перечня ВАК

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

2. Свириденко М. А. Новый способ увеличения параметра мемристора R_{off}/R_{on} на примере тонкопленочной структуры на основе оксида титана / М. А. Свириденко, А. Е. Уразбеков, П. Е. Троян, Ю. В. Сахаров // Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51, вып. 12. – С. 43-45.

Прочие публикации

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

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

5. 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.

6. Свириденко М. А. Влияние микрорельефа электрода и толщины диэлектрика на электрическую прочность и напряженность электрического поля

формовки тонкопленочных структур металл-диэлектрик-металл / М. А. Свириденко, П. Е. Троян // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 22-28.

7. Свириденко М. А. Исследование зависимости площади разрушения верхнего электрода от энергии пробоя тонкопленочного конденсатора / М. А. Свириденко, А. Е. Стрелкова, Ю. В. Сахаров // Актуальные проблемы науки и техники : II Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 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. Свириденко М. А. Уточнение формулы для расчета радиуса канала пробоя верхнего электрода тонкопленочного конденсатора (ТПК) / М. А. Свириденко, А. Е. Стрелкова, Ю. В. Сахаров // 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. Свириденко М. А. Влияние микрорельефа электрода и толщины диэлектрика на электрическую прочность и напряженность электрического поля формовки тонкопленочных структур металл-диэлектрик-металл / М. А. Свириденко, П. Е. Троян // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф. – 2022. – № 1-1. – С. 60-62

Соответствие содержания диссертации избранной специальности

Предмет исследования и материалы диссертационной работы соответствует специальности 1.3.5 — «Физическая электроника» по областям исследования:

Практическое применение физических явлений в твердотельных микро- и нано-структурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках, и покрытиях.

Диссертация «Технология получения и исследование электрофизических свойств тонких пленок оксидов металлов для создания мемристорных элементов памяти» Свириденко Марии Андреевны рекомендуется к защите на соискание

ученой степени кандидата технических наук по специальности и 1.3.5 - «Физическая электроника».

Заключение принято на семинаре кафедры физической электроники Института радиоэлектронной техники ТУСУР федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Присутствовало на заседании 9 чел., в том числе 4 д.т.н., 3 к.т.н. Результаты голосования: «за» — 9 чел., «против» — 0 чел., «воздержались» — нет, протокол № 63 от «14» апреля 2026 г.

Председатель НТС
Профессор каф.. ФЭ, д.т.н., профессор



Троян П.Е.

Секретарь заседания
Доцент каф. ФЭ, к.т.н., доцент



Жидик Ю.С.