

ОТЗЫВ

официального оппонента, Казанцева Виктора Борисовича,
на диссертацию **Андреевой Натальи Владимировны**
на тему:

**«Физико-технологические основы мемристивных нанослоевых композиций
для аналоговых нейроморфных электронных систем»**
на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников

Диссертационная работа Н.В. Андреевой посвящена исследованиям и разработке возможностей создания мультибитных мемристивных структур для использования в качестве новой электронной компонентной базы для решения задач искусственного интеллекта (организации аппаратного исполнения алгоритмов искусственных нейронных сетей).

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений, поскольку она направлена на разработку основ элементной базы высокопроизводительных вычислительных систем нового поколения, позволяющих осуществлять многопоточную обработку информации в режиме реального времени при существенном снижении энергопотребления и обеспечении автономного режима работы. В связи с перспективностью применения в микроэлектронике, исследованиями мемристивных структур (ReRAM – резистивная память с произвольным доступом), обеспечивающих аппаратную основу новой компьютерной парадигмы «вычислений в памяти» и биоподобных (нейроморфных) вычислений, занимаются все мировые лидеры в производстве памяти Samsung, Sony, Micron, Toshiba, Fujitsu, Sharp, Elpida, Hewlett Packard, Hynix, а также ведущие университеты США, стран Европы, Японии, Китая и Кореи.

Научная новизна, степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Работа безусловно обладает новизной, научные положения и выводы в полной мере обоснованы и достоверны.

В диссертации получен ряд важных теоретических и практических результатов, среди которых можно выделить следующие.

– Впервые показано, что одна и та же мемристивная композиция на основе последовательности тонких TiO_2 и Al_2O_3 -слоев может обеспечивать функциональный аналог синапса, как за счет электронных, так и за счет ионных

процессов, причем переход между ними определяется задаваемыми на этапе синтеза физическими свойствами входящих в структуру функциональных слоев.

– Впервые показано, что образование наноразмерной структуры TiO_2 -слоя в мемристивных $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -композициях обеспечивает переход к электронному характеру многоуровневой резистивной перестройки.

– Впервые показано, что реализация электронных аналогов синапсов с градиентной перестройкой сопротивления в мемристивных $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -композициях, в которых переключение между различными уровнями сопротивления достигается за счет перераспределения концентрации кислородных вакансий в функциональных слоях структуры (в том числе за счет окислительно-восстановительных процессов и электромиграции с участием ионов материала электрода), не обеспечивает оптимальных рабочих параметров структур с позиций их последующей интеграции в аппаратную часть нейроморфных блоков.

– Установлено влияние технологии мемристивных металлооксидных структур на их функциональные свойства и рабочие параметры. Определено влияние технологических параметров синтеза на проявление мемристивных эффектов в композициях на основе тонкопленочных TiO_2 и Al_2O_3 -слоев, и сегнетоэлектрических BaTiO_3 -пленок.

– Установлены физические механизмы многоуровневой резистивной перестройки в мемристивных композициях с тонкими сегнетоэлектрическими пленками титаната бария, определена роль поляризации и кислородных вакансий в процессах переключения сопротивления.

– Определены особенности проведения диагностики взаимосвязи локальных структурных и электрофизических свойств с использованием зондовых методов исследования тонких и сверхтонких пленок титаната бария, позволяющие разделить вклады сегнетоэлектрической поляризации и кислородных вакансий в процессы резистивной перестройки.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается историей развития работ по разработке и созданию физико-технологических основ компонентной базы для биоподобных вычислений,

проводимых соискателем в составе научного коллектива кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», начало которых было положено в 2014 году в рамках совместного проекта с Национальным институтом материаловедения Японии (NIMS); технологическими возможностями Центра микротехнологии и диагностики (ЦМИД) в области микро- и нанотехнологий, на базе которого выполнялись работы по поиску и оптимизации технологических решений мемристивных нанослоевых композиций; а также применением современных методов диагностики, в том числе использованием уникальной научной инфраструктуры центров коллективного пользования СПбГУ.

Разработанные модели эффектов многоуровневого переключения сопротивления в многослойных тонкопленочных композициях основаны на использовании известных теоретических представлений и сопоставлены с литературными теоретическими и экспериментальными данными.

Обоснованность и выводы эффективности результатов работы подтверждены патентом РФ (№ 2020132649, 2021 г.) на создание базового элемента нейроморфной электроники – мемристивного синапса.

Оценка содержания работы. Диссертационная работа представляет собой комплексное исследование аспектов создания композиций с тонкими металлооксидными и сегнетоэлектрическими пленками для использования в качестве основы электронного компонента многоуровневой энергонезависимой памяти при организации биоподобных вычислений. Диссертация отличается логическим единством и целостностью. К числу достоинств работы следует отнести системность, комплексность и методическую унификацию применяемых исследовательских подходов. Цель и задачи чётко сформулированы и последовательно раскрываются в тексте. Задачи проводимых в диссертационном исследовании работ фактически задаются аналитическим обзором **первой главы**, предшествующим изложению основных результатов диссертации, и посвященным оценке уровня развития современных нейроморфных вычислительных систем, используемых архитектурных, схемотехнических решений и элементной базы. В частности, в обзоре показывается, что многоуровневые мемристивные структуры позволяют не только увеличить плотность интеграции энергонезависимой памяти,

но и проектировать и создавать системы с использованием «вычислений в памяти». Основные выводы аналитического обзора определяют выбор диэлектрических материалов, а именно, тонких слоев оксидов металлов и сегнетоэлектриков, на базе которых в диссертационном исследовании разрабатываются физико-технологические основы мемристивных тонкопленочных композиций с многоуровневой перестройкой сопротивления.

Результаты фундаментальных и поисковых исследований свойств выбранных диэлектрических материалов, реализующих в тонкопленочном исполнении функцию синаптической пластичности, приводятся во **второй главе** работы. Здесь же показывается, что основные проблемы, возникающие на пути интеграции тонкопленочных мемристивных структур в кроссбар-массивы нейроморфных блоков, обусловлены особенностями физических механизмов переноса электронов в гетероструктурах с оксидными диэлектриками; а сложности разработки систем с многоуровневой резистивной перестройкой определяется тем фактом, что возникновение промежуточных резистивных состояний, как правило, ассоциируется с наличием подвижных ионов или кислородных вакансий в оксидных диэлектрических пленках, распределением которых крайне трудно управлять. В связи с данным обстоятельством, в качестве одного из подходов к созданию многоуровневых мемристивных композиций в работе выбирается использование тонкопленочных сегнетоэлектриков, изменение резистивного состояния которых связывается с их сегнетоэлектрическими свойствами, а именно, доменной структурой.

Сопоставительный анализ рабочих параметров существующих мемристивных структур с требованиями, предъявляемыми при их интеграции в вычислительные архитектуры, приводится в **третьей главе**. По его результатам устанавливаются основные тенденции развития многоуровневой мемристорной ЭКБ, необходимые для учета при достижении цели диссертационной работы.

В **четвертой главе** представляется разработанная технология мемристивных структур на базе последовательности тонких пленок оксидов алюминия и титана, позволяющая варьировать спектр наблюдаемых резистивных эффектов от характерного для двухбитовых мемристоров биполярного переключения до аналоговой многоуровневой перестройки сопротивления. В результате большого

объема проделанной экспериментальной работы по исследованию влияния условий синтеза, материала электродов, структурно-геометрических параметров синтезируемых металлооксидных слоев на их электрофизические свойства, а также работ по физико-топологическому моделированию рабочих параметров структур, соискателем были проанализированы физические процессы, протекающие в исследуемых мемристивных системах и их роль в проявлении резистивных эффектов, что, в конечном итоге, привело к созданию мемристивных TiO_2/Al_2O_3 -композиций с шириной окна памяти на уровне 7 порядков по значению и совокупностью стабильных промежуточных резистивных состояний.

Завершенность диссертационному исследованию придает рассмотрение альтернативных способов организации многоуровневого переключения сопротивления в мемристивных композициях на базе тонких $BaTiO_3$ -пленок за счет сочетанного изменения состояния поляризации с концентрацией кислородных вакансий, изложенное в **пятой главе**. Целью которого является преодоление главного недостатка «традиционных» мемристоров на основе тонкопленочных металлооксидных структур (под «традиционными» подразумеваются мемристоры, в которых перестройка резистивного состояния обусловлена перераспределением кислородных вакансий), в качестве которого выступает вариабельность их основных рабочих характеристик, обусловленная влиянием флуктуаций микроскопических параметров.

В **заключении** диссертации представлены основные выводы, сформулированные на основании проведенных исследований.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Список публикаций по материалам диссертации представлен 48 работами, 21 из которых – в зарубежных изданиях, индексируемых в базах WoS и/или Scopus.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Результаты, полученные в диссертационной работе имеют большое фундаментально-научное значение, демонстрируют возможность создания дизайна нанослоевых мемристивных композиций с управляемой многоуровневой перестройкой сопротивления. К наиболее важным практическим результатам можно отнести следующие:

– Обнаружение влияния наноразмерных особенностей структуры функциональных слоев на характер и параметры резистивной перестройки в мемристивных $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -композициях, а именно, переход к электронному характеру переключения сопротивления при образовании наноразмерных включения фазы анатаза с *p*-типом проводимости в функциональном TiO_2 -слое.

– Предложенные подходы к управлению характером и значимыми для практического применения параметрами многоуровневой перестройки сопротивления в двухслойных мемристивных $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -композициях.

– Обнаружение участия кислородных вакансий в многоуровневой резистивной перестройке в мемристивных композициях с поликристаллическими сегнетоэлектрическими BaTiO_3 -пленками, наблюдаемое исключительно при использовании в составе композиции слоев металла, обладающего химической активностью по отношению к кислороду.

– Предложенный комплекс методик исследования взаимосвязи локальных структурных и электрофизических свойств мемристивных композиций, адаптированный к изучению тонкопленочных структур и позволяющий выявить вклад интерфейсных областей в резистивные эффекты в случае композиций с тонкими сегнетоэлектрическими пленками.

Замечания к диссертационной работе следующие.

1. Неясно, оказывает ли влияние влажность окружающей среды на проявление резистивных эффектов, обусловленных функциональными свойствами Al_2O_3 -слоя в $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -композициях?

2. Проводились ли исследования температурной динамики многоуровневой резистивной перестройки в $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -композициях?

3. Известно, что при интеграции в структуру кроссбар-массива металлооксидные слои с переключением сопротивления требуют использования селектора. Учитывая широкий диапазон перестройки сопротивления разработанных в диссертации $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -композиций, каковы практические перспективы интеграции таких структур в кроссбар-массивы с учетом характеристик существующих в настоящее время селекторов?

Заключение

Указанные замечания являются непринципиальными и имеют скорее технический характер, не влияя на основные результаты представленного диссертационного исследования.

Считаю, что диссертация представляет собой законченное исследование и вносит весомый вклад в развитие современной теории нейроморфных систем. Научные положения, выводы и рекомендации обоснованы и достоверны. Диссертация отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Андреева Наталья Владимировна безусловно заслуживает присвоения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент,

д.ф.-м.н., доцент

заведующий кафедрой нейротехнологий

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Российская Федерация, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

тел.: +7 (831) 462-32-27, e-mail: vkazan@unn.ru, [https:// http://www.unn.ru/](https://http://www.unn.ru/)

 / Казанцев Виктор Борисович

Подпись В.Б.Казанцева заверено

Проректор по учебной работе



А.В. Князев