

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.418.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 15.03.2023 № 5

О присуждении Ибрагиму Абдулле Хайдар Абдо, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Математическое моделирование процессов резистивного переключения в мемристоре и обработки информации в мемристорно-диодных кроссбарах входного и выходного устройств биоморфного нейропроцессора» по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 21 декабря 2022 года, протокол заседания №4 диссертационным советом 24.2.418.03, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. Приказ Минобрнауки России от 09.11.2012 № 717/нк.

Соискатель Ибрагим Абдулла Хайдар Абдо, 01.01.1989 года рождения, в 2017 году окончил с отличием магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

В период подготовки диссертации соискатель Ибрагим Абдулла Хайдар Абдо обучался в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» (профиль:

Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика) с 01.09.2020 по настоящее время, предполагаемый срок окончания обучения 31.08.2024.

При обучении в аспирантуре он факультативно посещал занятия в Институте математики и компьютерных наук ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» по дисциплинам: «Теория и средства математического моделирования», «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», «Методы и средства вычислительной математики» и сдал кандидатский экзамен по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Справка № 22 от 09.06.2022 г. о сдаче кандидатских экзаменов выдана федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Тюменский государственный университет».

В настоящее время Ибрагим А.Х.А. работает младшим научным сотрудником в лаборатории наноматериалов и наноэлектроники Центра природовдохновленного инжиниринга ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет».

Диссертация выполнена на кафедре прикладной и технической физики Физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет», Министерство науки и высшего образования.

Научный руководитель – Удовиченко Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, научный руководитель Центра природовдохновленного инжиниринга, профессор кафедры прикладной и технической физики Физико-технического института ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет».

Официальные оппоненты: 1) **Рыльков Владимир Васильевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории технологий искусственного интеллекта ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»; 2) **Андреева Наталья Владимировна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники, ведущий научный сотрудник НОЦ «Нанотехнологии»

ФГАОУ ВО Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ФГБОУ ВО ВлГУ, г. Владимир) в своем положительном отзыве, подписанном доктором технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление, обработка информации, профессором, заведующим кафедрой «Программная инженерия» Муромского института ФГБОУ ВО ВлГУ **Жизняковым Аркадием Львовичем** и кандидатом технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление, обработка информации, ведущим научным сотрудником лаборатории разработки систем искусственного интеллекта Муромского института ФГБОУ ВО ВлГУ **Щаниковым Сергеем Андреевичем**, указала, что диссертационная работа Ибрагима Абдуллы Хайдар Абдо «Математическое моделирование процессов резистивного переключения в мемристоре и обработки информации в мемристорно-диодных кроссбарах входного и выходного устройств биоморфного нейропроцессора» по содержанию, оформлению, актуальности, научной новизне, научной и практической значимости, достоверности полученных результатов соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Ибрагим Абдулла Хайдар Абдо, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Соискатель имеет 20 работ по теме диссертации, из которых 3 входит в издания из международных баз данных WoS, Scopus и 4 публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ. Общий объем научных изданий 9,7 п.л., из них вклад автора – 6,6 п.л. Получено 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают ее основные положения. В диссертации отсутствуют недостоверные

сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые публикации:

1. Udovichenko S., Busygin A., Ebrahim A., Bobylev A., Gubin A. Mathematical model of metal-oxide memristor resistive switching based on full physical model of heat and mass transfer of oxygen vacancies and ions // *Physica status solidi (a) Applications and Materials Science*. 2022. Article 2200478. (*Scopus*)
2. Ибрагим А.Х., Бусыгин А.Н., Удовиченко С.Ю. Математическое моделирование процессов резистивного переключения в мемристоре на основе полной модели процессов массопереноса кислородных вакансий и ионов // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2022. Том 8. № 2. С. 198-214. (*Перечень ВАК РФ*)
3. Ибрагим А.Х., Удовиченко С.Ю. Алгоритмы для построения и моделирования работы больших электрических цепей с мемристорно-диодными кроссбарами в биоморфном нейропроцессоре // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2022. Том 8. №4. С.163-178. (*Перечень ВАК РФ*)
4. Ebrahim A.H., Udovichenko S. Yu. Automatic building of electrical circuits of biomorphic neuroprocessor units and visualization of their numerical simulation // *Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS)*. 2022. V.342. P.16-23. (*Scopus*)
5. Busygin A.N., Ebrahim A.H., Pisarev A.D., Udovichenko S.Yu. Input device for a biomorphic neuroprocessor based on a memristor-diode crossbar for the pulse coding of information // *Nanobiotechnology Reports*. 2021. V.16. N.6 P.798-803. (*Scopus*)
6. Ибрагим А.Х., Удовиченко С.Ю. Математическое моделирование резистивных состояний и динамического переключения мемристора на основе оксида металла // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2020. Том 6. № 2. С. 127-144. (*Перечень ВАК РФ*)

7. Писарев А. Д., Бусыгин А.Н., Ибрагим А. Х., Удовиченко С.Ю. Моделирование процессов декодирования информации в выходном устройстве биоморфного нейропроцессора // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 4. С. 179-193. (Перечень ВАК РФ)

8. Ибрагим А.Х., Удовиченко С.Ю. Программа для расчетов резистивных состояний и переключения мемристора // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611392. Дата публикации: 27.01.2021.

9. Ибрагим А.Х., Удовиченко С.Ю. Программа MDC-SPICE для расчета больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021612448. Дата публикации: 17.02.2021.

10. Ибрагим А.Х., Удовиченко С.Ю. Программный модуль для автоматического построения электрической схемы выходного блока нейропроцессора номер регистрации // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663870. Дата публикации: 25.08.2021.

11. Ибрагим А.Х., Удовиченко С.Ю. Программный модуль для автоматического построения электрической схемы входного блока нейропроцессора // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663088. Дата публикации: 13.07.21.

12. Ибрагим А.Х., Удовиченко С.Ю. Программа для визуализации результатов расчета, полученных с помощью симулятора MDC-SPIC // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663717. Дата публикации: 23.08.2021.

На автореферат поступили отзывы от:

1. Доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры Информационных технологий и систем ФГБОУ «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого». **Петрова Р.В.**, отзыв положительный с замечанием:

1. Орфографические ошибки (стр.9, с.6; стр.10, с.23, 32, стр.14, с.6).

2. Член-корреспондента РАН, доктора технических наук, профессора, зам. руководителя приоритетного технологического направления «Электронные технологии» АО «НИИМЭ» **Горнева Е.С.** и кандидата технических наук, начальника лаборатории исследования нейроморфных систем АО «НИИМЭ», доцента базовой кафедры микро- и наноэлектроники МФТИ **Тельминова О.А.**, отзыв положительный с замечаниями:

1. Предлагаемая соискателем модель описывает только одномерное распределение вакансий между пластинами, на которые подано постоянное напряжение, а не переключение, как было заявлено. Нужно также отметить, что модель также не является поведенческой, поскольку не моделирует временную зависимость, и построенная характеристика не может корректно учесть эволюцию выделяемой мощности устройства. Важность рассмотрения, по крайней мере 2D структуры в физическом моделировании можно увидеть в актуальной работе [Lee S. H. et al. Quantitative, dynamic TaO_x memristor/resistive random access memory model //ACS Applied Electronic Materials. 2020. Т.2. №3. С. 701-709], где решается аналогичная задача моделирования оксида металла.

2. Не совсем понятен смысл моделирования распределения тепла в стационарном случае, если мы хотим подавать на структуру набор импульсов высокой частоты. Вопросы вызывает симметричность графиков распределения температуры в поперечном сечении устройства (стр. 53) – при линейной зависимости проводимости от концентрации и существенно нелинейного распределения этой концентрации по толщине (стр. 49). Таким образом, необходимо обосновать выбор одномерной задачи, выбор стационарной задачи, применимость модели к реальным задачам и пояснить симметричность графика распределения температуры внутри слоя мемристора.

3. Хорошо бы пояснить: как стационарная модель из прошлой главы используется при моделировании поведения устройства во времени и выбор компактной модели [Biolek D., Di Ventra M., Pershin Y.V. Reliable SPICE Simulations

of Memristors, Memcapacitors and Meminductors // Radioengineering, 2013. V.22. 4. P. 945-968], моделирующей распределение тока по времени.

4. Неплохо было бы определить область применимости разработанной модели «нейронного блока», выполненной без учёта основных проблем создания такого устройства (нестабильность, шумы, утечки). Пример решения актуальных задач на основе простейших структур можно найти в последней работе [Jin P., Liang Y., et al. Shortcuts to Edge-of-Chaos Domains of Memristive Circuits and Historic Measurement of Contiguous Triple-Branch V-I Curve of Chua Corsage Memristor // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2022. V.32(15). 2230035].

5. Следует отметить отсутствие в автореферате анализа семейства экспериментальных ВАХ для мемристоров с формовочными и бесформовочными свойствами в сравнении с модельными кривыми.

6. Не приведена оценка точности построенных алгоритмов моделирования процессов обработки информации входного и выходного блоков нейропроцессора.

3. Доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой физической электроники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники **Трояна П.Е.**, отзыв положительный с замечаниями:

1. В качестве замечания можно обратить внимание на то, что при построении алгоритма моделирования работы больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары, задействован алгоритм идеальной математической модели мемристора, при этом уже используется ранее разработанный алгоритм моделирования работы реального мемристора.

4. Доктора физико-математических наук, профессора кафедры физики твердого тела Воронежского государственного технического университета **Ситникова А.В.**, отзыв положительный с замечаниями:

1. Рис.4а иллюстрирует процесс резистивного переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние при возрастании напряжения. На рисунке не представлена ветвь обратного резистивного переключения мемристора при отрицательном напряжении на мемристоре. Этот участок вольт-амперной

характеристики также представляет интерес при исследовании электрических свойств твердотельных мемристоров и мемристорных массивов.

2. Уравнение (3), описывающее процесс теплопереноса при движении вакансий в электрическом поле, в правой части содержит члены, связанные с рождением и рекомбинацией заряженных частиц. Но их роль в распределении температуры в оксидном слое не показана. Очевидно, они не дают существенного вклада в процесс нагрева.

3. В алгоритм моделирования резистивных состояний мемристора не заложен анализ в уравнениях (1) и (2) членов, связанных с термофорезом и пропорциональных градиенту температуры. Утверждается, что их вклад в нагрев оксидного слоя мал из-за небольшого диапазона изменения температуры. Однако из рис.4.б следует, что этот диапазон достаточно велик и составляет 100 К.

4. Аналитическое решение для распределения концентрации вакансий по толщине мемристорного слоя, показанного на рис.2а, дает только качественное согласие с результатом численного решения полной стационарной математической модели мемристора. Насколько востребовано такое аналитическое решение?

5. Доктора физико-математических наук, доцента, ведущего научного сотрудника научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского **Филатова Д.О.**, отзыв положительный с замечанием:

1. К замечанию можно отнести, отсутствие пояснений к рис.2б и рис.4а по обратному резистивному переключению при подаче отрицательного напряжения на электрод мемристора.

6. Доктора физико-математических наук, профессора РАН, доцента, главного научного сотрудника лаборатории синтеза новых материалов ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН **Чернова А.А.**, отзыв положительный с замечаниями:

1. С помощью численного моделирования показана определяющая роль тех или иных членов в уравнениях для концентрации кислородных вакансий и ионов,

связанных с рождением и рекомбинацией заряженных частиц. В уравнении теплопереноса же она не проанализирована.

2. Не проанализирована роль тех или иных членов в уравнениях для концентрации кислородных вакансий и ионов, связанных с термофорезом, пропорциональных градиенту температуры.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются специалистами высокого уровня в области математического моделирования физических процессов, протекающих в отдельных твердотельных мемристорах и в мемристорных массивах, а также в области моделирования процессов обработки электрических импульсов при программировании и обучении мемристорных кроссбаров, что позволяет им оценить научную и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан итерационный алгоритм, построенный с помощью метода конечных разностей для проблемно-ориентированной программы моделирования процесса резистивного переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние на основе анализа выбранной математической модели;

предложена наиболее полная математическая модель процессов стационарного теплопереноса кислородных вакансий и ионов в твердотельном мемристоре, созданном на основе оксида металла;

показано хорошее согласие результатов вычислительного эксперимента по моделированию процесса резистивного переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние с экспериментальными данными;

разработан алгоритм проблемно-ориентированной программы MDC-SPICE для математического моделирования работы больших электрических схем с мемристорно-диодными кроссбарами, который построен на основе известного алгоритма симулятора SPICE и включающий математические модели мемристора и

селективного элемента диода Зенера, а также созданный алгоритм моделирования резистивного переключения мемристора;

введены упрощения в известных математических моделях мемристора и селективного элемента диода Зенера, связанные с жестким ограничением изменения параметра состояния мемристора в интервале от 0 до 1 для обеспечения его правильной работы и заменой нелинейных участков вольт-амперной характеристики диода на линейные отрезки для ускорения расчета;

созданы алгоритмы автоматического построения электрических схем входного кодирующего и выходного декодирующего устройств биоморфного нейропроцессора, включающих универсальную логическую матрицу с мемристорно-диодным кроссбаром;

подтверждена с помощью имитационного моделирования в программе MDC-SPICE работоспособность электрических схем входного устройства, кодирующего двоичное число в импульсы, и выходного устройства, декодирующего импульсы от нейронной сети в двоичный код.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана корректность и возможность использования разработанных алгоритмов и соответствующих проблемно-ориентированных программ для моделирования процесса резистивного переключения мемристора и процессов обработки информации в больших мемристорно-диодных массивах на основе согласия результатов численного моделирования и экспериментальных данных; применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов).

использованы численный метод конечных разностей и программа SPICE, предназначенная для моделирования работы больших электрических схем;

проведена модернизация алгоритма моделирования программы SPICE путем включения в него разработанного алгоритма резистивного переключения мемристора, а также не использованных ранее алгоритмов уточнённых идеальных моделей мемристора и диода Зенера.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и зарегистрированы эффективные проблемно-ориентированные программы для моделирования процесса резистивного переключения мемристора и процессов обработки информации в больших мемристорно-диодных массивах, а также программ автоматического построения электрических схем входного кодирующего и выходного декодирующего устройств нейропроцессора;

определена применимость выбранной математической модели резистивного переключения мемристора и полученных результатов численного моделирования для программирования больших мемристорных массивов, а также при реализации ассоциативного самообучения аппаратной нейросети нейропроцессора, построенной на основе запоминающей матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром;

обоснована возможность использования разработанных программных продуктов, обеспечивающих моделирование процессов обработки информации, при проектировании нейропроцессора в рамках соглашения о сотрудничестве между ТюмГУ и АО НИИ Молекулярной Электроники (НИИМЭ) и изготовлении его прототипа на предприятии ПАО «Микрон».

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на основе фундаментальных законов сохранения и наиболее полной математической модели тепломассопереноса при протекании электрических зарядов в твердом теле;

идея базируется на обобщении методов аналитического и численного исследования задачи резистивного переключения твердотельного мемристора;

использованы: апробированный численный метод конечных разностей и известный программный продукт SPICE;

установлена корректность алгоритмов и созданных на их основе программ моделирования работы отдельных мемристоров и мемристорно-диодных массивов в кодирующем и декодирующем устройствах нейропроцессора на основе совпадения

расчетных и экспериментальных участков вольт-амперных характеристик мемристора и подтверждения работоспособности входного и выходного устройств нейропроцессора.

Личный вклад автора заключается в разработке алгоритмов моделирования и их реализации в виде комплекса проблемно-ориентированных программ, включая отладку и тестирование, и проведении вычислительных экспериментов. В совместных исследованиях автор принимал участие на всех этапах работы: в постановках задач, в выборе и формулировке математических моделей, анализе полученных результатов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. В полной математической модели тепломассопереноса при транспорте кислородных вакансий и ионов в электрическом поле оксидного слоя мемристора уравнение для поля дано в виде уравнения Лапласа, т.е. поле считается постоянным, в то же время при численном моделировании используется переменное электрическое поле.

2. В алгоритме моделирования больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары используется идеальная математическая модель мемристора, в то время как в этот же алгоритм встроен алгоритм моделирования работы реального мемристора.

3. Аналитическое решение для распределения концентрации вакансий по толщине мемристорного слоя дает только качественное согласие с результатом численного решения полной стационарной математической модели мемристора. Насколько востребовано такое аналитическое решение?

4. Не приведена оценка точности построенных алгоритмов моделирования процессов обработки информации входного и выходного блоков нейропроцессора.

Соискатель Ибрагим А.Х.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. В большинстве цитируемых математических моделей тепломассопереноса в мемристоре используется приближение постоянного электрического поля, которое справедливо из-за малой электропроводности диэлектрического оксида металла. Внешнее электрическое поле незначительно искажается свободными и захваченными носителями заряда, и его распределение в диэлектрическом слое определяется с помощью стационарного уравнения Лапласа. В этом случае разработан достаточно простой алгоритм моделирования работы мемристора на основе аналитического решения для концентрации кислородных вакансий. Проведено сравнение численного решения модели мемристора с переменным электрическим полем и аналитического с постоянным полем.

2. В алгоритм программы MDC-SPICE включены два независимых блока: алгоритм резистивного переключения в идеальной модели мемристора и разработанный алгоритм математической модели мемристора на основе физических процессов, протекающих в нём. Эти алгоритмы могут использоваться отдельно в зависимости от поставленной задачи исследования больших мемристорно-диодных массивов.

3. Аналитическое решение для распределения концентрации вакансий по толщине мемристорного слоя реализуется в условиях большой величины электрического поля, когда диффузионным дрейфом зарядов можно пренебречь по сравнению с полевым. Очевидно, при использованных из эксперимента параметрах мемристора величина электрического поля оказалась недостаточной для того, чтобы пренебречь диффузионными членами. Для других экспериментальных данных при увеличении напряжения на электроде и уменьшении толщины оксидного слоя аналитическая модель будет адекватна эксперименту.

4. Такая оценка не проводилась из-за отсутствия экспериментальных результатов кодирования двоичного числа в частоту импульсов напряжения и обратного декодирования импульсов в двоичный код. Целью работы была демонстрация работоспособности и функциональных возможностей соответствующих устройств.

На заседании 15.03.2023 диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей значение для развития моделирования процессов резистивного переключения мемристоров и обработки информации в больших мемристорных массивах биоморфного нейропроцессора, принял решение присудить Ибрагиму А.Х.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки), участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за – 13, против – 2, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

15.03.2023



Захаров Александр Анатольевич

Оленников Алексей Александрович