

Вх. № 3/23

от 22.02.2023г.

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук,
Андреевой Натальи Владимировны на диссертационную работу

Ибрагима Абдуллы Хайдара Абдо

на тему: «**Математическое моделирование процессов резистивного переключения в мемристоре и обработки информации в мемристорно-диодных кроссбарах входного и выходного устройств биоморфного нейропроцессора**»

Представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа А.Х.А. Ибрагима посвящена разработке алгоритмов физико-топологического моделирования процессов резистивного переключения в мемристорах, а также созданию на их основе комплекса проблемно-ориентированных программ имитационного моделирования электрических схем нейропроцессора, содержащих мемристорно-диодные кроссбары.

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений, поскольку она ориентирована на разработку основных функциональных блоков нейроморфных архитектур, обеспечивающих эффективный способ решения задач искусственного интеллекта.

Выступая в роли ключевого элемента нейроморфных архитектур, мемристоры в структуре кроссбаров позволяют эффективно реализовывать операции матрично-векторного умножения, которые являются основными при интеграции механизмов обучения и памяти в таких системах. Разработка физико-топологических моделей перестройки уровня проводимости металлооксидных мемристоров позволяет выявить вклады физических процессов тепломассопереноса кислородных вакансий и ионов в резистивные эффекты, и направлена на оптимизацию электрофизических параметров мемристоров, обеспечивающих эффективную реализацию вычислений в памяти в структуре нейропроцессоров.

Имитационное моделирование процессов обработки информации в функциональных блоках нейроморфных архитектур на базе мемристорно-

диодных кроссбаров направлено на эмуляцию работы нейропроцессорных блоков с целью верификации и отладки разрабатываемых схемотехнических решений.

Научная новизна, степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Работу отличают новизна подходов и выбранных решений, а также высокая степень обоснованности сформулированных научных положений и выводов.

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

– Разработаны алгоритмы, позволяющие моделировать перестройку уровня проводимости мемристоров, обеспечиваемую процессами тепло- и массопереноса кислородных вакансий и ионов в тонких металлооксидных пленках под действием приложенного напряжения.

– На основе развитых в работе физико-топологических моделей резистивной перестройки в мемристорах, разработаны алгоритмы обработки информации в больших мемристорно-диодных массивах с элементарной ячейкой, объединяющей мемристоры с селективными диодами Зенера.

– Разработан комплекс проблемно-ориентированных программ MDC-SPICE для имитационного моделирования логических матриц на основе мемристорно-диодного кроссбара в структуре биоморфного нейропроцессора.

– Разработана программа автоматического построения электрической схемы входного кодирующего устройства биоморфного нейропроцессора на базе комбинированного мемристорно-диодного кроссбара.

Разработана программа автоматического построения электрической схемы выходного декодирующего устройства биоморфного нейропроцессора на базе комбинированного мемристорно-диодного кроссбара.

Представленные в работе результаты получены впервые и признаны как отечественной, так и зарубежной научной общественностью, были представлены и широко обсуждались на российских и международных научных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций

Обоснованность и выводы высокой эффективности результатов работы подтверждены сертификацией созданного Программного комплекса,

включающего: «Программу для расчетов резистивных состояний и переключения мемристора», свидетельство о ГРП для ЭВМ № 2021611392 от 27.01.2021; «Программу MDC-SPICE для расчета больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары», № 2021612448 от 17.02.2021; «Программный модуль для автоматического построения электрической схемы входного блока нейропроцессора», № 2021663088 от 13.07.2021; «Программный модуль для автоматического построения электрической схемы выходного блока нейропроцессора», № 2021663870 от 25.08.2021; «Программу для визуализации результатов расчета, полученных с помощью симулятора MDC-SPICE», №2021663717 от 23.08.2021.

Оценка содержания работы

Диссертационная работа представляет собой комплексное исследование аспектов создания алгоритмов моделирования резистивной перестройки в металлооксидных мемристорах, а также логических матриц на основе комбинированного мемристорно-диодного кроссбара для имитационного моделирования процессов обработки информации в кодирующем и декодирующем устройствах биоморфного нейропроцессора.

Диссертация отличается логической связностью и целостностью. К числу достоинств работы следует отнести систематичность и единообразие применяемых исследовательских подходов. Цель и задачи чётко сформулированы и последовательно раскрываются в тексте. Ход работ, проводимых в диссертационном исследовании, задается аналитическим обзором **первой главы**, предшествующим изложению основных результатов диссертации, и посвященным анализу математических и схемотехнических моделей процессов резистивного переключения в металлооксидных мемристорах. Рассмотрен мемристорный массив с селективным элементом – диодом, который может быть применен в логической матрице входного устройства, кодирующего информацию в импульсы, и выходного устройства нейропроцессора, декодирующего импульсы от нейронной сети в двоичный код. Представлены принципы кодирования информации одним нейроном и их популяцией.

Во **второй главе** представлены итерационный алгоритм и проблемно-ориентированная программа для моделирования резистивных состояний мемристора, построенные на основе анализа выбранной математической модели

процессов стационарного тепломассопереноса кислородных вакансий и ионов в металлооксидном слое мемристорной структуры. Найдено аналитическое решение, описывающее резистивные эффекты в условиях сильного электрического поля, позволяющее упростить моделирование работы больших мемристорных массивов.

В **третьей главе** изложены результаты, полученные в рамках разработки алгоритма и соответствующей программы автоматического построения электрической схемы входного кодирующего устройства биоморфного нейропроцессора на основе логической матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром.

Для численного моделирования работы больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные массивы, разработаны алгоритм и соответствующая проблемно-ориентированная программа MDC-SPICE, созданные на основе программы SPICE, уточнённых математических моделей мемристора, селективного элемента - диода Зенера, а также разработанного алгоритма для моделирования резистивных эффектов.

Представлены результаты численного моделирования работы кодирующего устройства на основе логической матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром в режиме кодирования двоичного числа в импульсы с помощью виртуальных нейронов.

В **четвертой главе** приводятся результаты моделирования работы выходного устройства нейропроцессора с использованием разработанной проблемно-ориентированной программы MDC-SPICE, декодирующего импульсы от нейронного блока в стандартный двоичный код. Выходное устройство нейропроцессора спроектировано на универсальной логической матрице с мемристорно-диодным кроссбаром. При проектировании электрической схемы декодирующего устройства применялись созданные алгоритм и проблемно-ориентированная программа.

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертации, а в приложении представлены свидетельства на регистрацию разработанных программ.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Список публикаций по материалам диссертации представлен 19 работами, 6 из которых – в зарубежных изданиях, индексируемых в базах WoS и/или Scopus.

Значимость полученных результатов для науки и производства

Созданный в работе комплекс программ позволяет проводить математическое моделирование физических процессов, лежащих в основе резистивной перестройки мемристорных структур; имитационное моделирование работы мемристоров в структуре кроссбаров направлено на повышение эффективности обработки информации в нейроморфных системах на их основе.

Имитационное моделирование востребовано на стадиях проектирования и отладки электрических схем функциональных блоков прототипов биоморфного нейропроцессора, которое, согласно приведенным в диссертационной работе данным, осуществляется в рамках договора о сотрудничестве между ФГАО ВО «Тюменский государственный университет» и АО НИИ Молекулярной Электроники, и изготовления на предприятии ПАО «Микрон», г. Москва, Зеленоград.

Замечания

1. Физический механизм переключения сопротивления в металлооксидных мемристорах, принятый за основу при разработке математической модели, стоило описать более подробно в первой главе диссертации.

2. Проводились ли оценки погрешности при расчете скалярного поля концентраций вакансий путем численного решения задачи Коши методом Эйлера (стр. 43)?

3. Результаты расчетов, полученные с применением предложенного в диссертационной работе итерационного алгоритма моделирования процесса резистивного переключения мемристора с использованием конечно-разностных схем, сравнивались с ранее опубликованными экспериментальными данными, что, несомненно, свидетельствует об адекватности разработанного метода расчета. Вместе с тем, возникает вопрос относительно оценок эффективности разработанного алгоритма. Проводились ли подобные оценки, например, путем сравнения результатов расчетов, полученных с применением выбранной конечно-разностной схемы, с результатами, полученными с использованием других конечно-разностных схем?

4. Из приведенного в работе описания моделирования работы логической матрицы на основе мемристорно-диодного кроссбара не совсем понятно, какие эффекты учитывались при оценке максимально допустимого размера кроссбара? Учитывались ли шунтирующие токи? В работе встречается только упоминание о переходных процессах. Не приводятся данные о параметрах диодов Зенера и самих мемристорах, используемых при моделировании работы кроссбара.

5. В диссертационной работе вместо часто встречающегося определения «полная математическая модель» рекомендуется использовать определение «наиболее полная из существующих», т.к. в используемой в диссертации модели, представленной в работе [Chernov A.A. Three-dimensional non-linear complex model of dynamic memristor switching / Chernov A.A., Islamov D.R., Pik'nik A.A., Perevalov T.V., Gritsenko V.A. // ECS Transactions. 2017. Vol.75. No.32. Pp.95-104; DOI:10.1149/07532.0095], наиболее полно включены процессы тепломассопереноса, гибели и рождения заряженных частиц, а также источников нагрева и охлаждения оксида металла.

6. Помимо многочисленных опечаток в работе часто встречаются неоднозначные или незаконченные фразы и определения. Так, например, вызывает трудности с восприятием подпись к Рисунку 2.7 «Дискретные состояния мемристора: 1 – закрытое, 2 – при 65% от максимума вакансий, 3 – при 84% от максимума вакансий, 4 – минимальное сопротивление (максимум вакансий)». Что имеется в виду под «65 % от максимума вакансий»? Фраза на стр. 45 «Из рис. 2.3 следует, что большей температуре вакансий соответствует более высокая их концентрация» также вызывает непонимание.

Заключение

Указанные замечания ни в коей мере не умаляют высокой значимости представленного диссертационного исследования.

По результатам изучения диссертации, автореферата и публикаций соискателя по теме диссертации, можно заключить, то автором выполнена работа на актуальную тему, сформулированные в работе научные положения, выводы и рекомендации обоснованы и достоверны.

Диссертация Ибрагима А.Х.А. отвечает требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание

ученой степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Оппонент

Доцент кафедры микро- и наноэлектроники,

ведущий научный сотрудник

Научно-образовательного центра «Нанотехнологии»

Санкт-Петербургского государственного

Электротехнического университета «ЛЭТИ»

им. В.И. Ульянова (Ленина),

кандидат физико-математических наук

по специальности

01.04.21 – лазерная физика

Н.В. Андреева

10 февраля 2023 г.

Подпись Н.В. Андреевой заверяю



Андреева Наталья Владимировна,

E-mail: nvandreeva@etu.ru, nvandr@gmail.com

Телефон: +7 812 346-44-87

197022, Россия, Санкт-Петербург,

ул. Профессора Попова, дом 5, литера Ф

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»