

Вх. № 4/23

от 22.02.2023г.

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **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 нейромпроцессора**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа диссертацию Ибрагима Абдуллы Хайдара Абдо посвящена созданию алгоритмов моделирования и на их основе комплекса проблемно-ориентированных программ, предназначенных для вычислительных экспериментов по моделированию процессов переключения резистивных состояний мемристора, а также обработки информации в кодирующем и декодирующем устройствах биоморфного нейромпроцессора, включающих логическую матрицу с мемристорно-диодным кроссбаром.

Актуальность темы диссертационной работы

Для обработки информации с помощью больших мемристорных массивов необходим достаточно простой алгоритм и соответствующая программа математического моделирования процесса переключения резистивных состояний мемристора на основе анализа математической модели переноса зарядов в электрическом поле активного слоя мемристора. Такой алгоритм моделирования важен для программирования резистивных состояний мемристоров в матрицах повышенной плотности, а также при реализации ассоциативного самообучения аппаратной нейросети нейромпроцессора, построенной на основе запоминающей матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром.

Для автоматизированного построения электрических схем входного кодирующего и выходного декодирующего устройств нейромпроцессора, включающих большие логические матрицы с мемристорно-диодными кроссбарами, необходима разработка соответствующих алгоритмов моделирования и специальных программ. Для математического моделирования работы этих устройств необходима специализированная программа по обработке информации в больших электрических схемах, содержащих мемристорно-диодные кроссбары.

Анализ структуры и содержание работы

Диссертационная работа изложена на 101 странице и включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. Текст

включает 42 рисунка. Список используемой литературы насчитывает 88 наименований.

Во введении определены цель и задачи исследования, обоснована актуальность выбранного направления исследования, охарактеризована научная новизна и практическая значимость, сформулированы выносимые на защиту положения, а также приведены данные об апробации работы.

В первой главе дан обзор литературы по существующим моделям, описывающим резистивное переключение мемристоров с активным слоем оксида металла, основанных на физических процессах переноса зарядов в электрическом поле. Рассмотрены схематические модели резистивного переключения мемристоров в виде эквивалентных электрических схем, в которых используются системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассмотрены мемристорные массивы, которые могут быть востребованы при разработке входного устройства, кодирующего информацию в импульсы, и выходного устройства нейропроцессора, декодирующего импульсы от нейронной сети в двоичный код.

Во второй главе сделан выбор математической модели процессов тепломассопереноса кислородных вакансий и ионов, включающей их генерацию, рекомбинацию, диффузию и дрейф в электрическом поле в структуре металл-оксид-металл, а также выбор математической модели резистивного переключения мемристора.

Представлены итерационный алгоритм и проблемно-ориентированная программа для математического моделирования процесса резистивного переключения мемристора, построенные на основе анализа замкнутой математической модели процессов стационарного тепломассопереноса кислородных вакансий и ионов, включающей их генерацию, рекомбинацию, диффузию и дрейф в электрическом поле в структуре металл-оксид-металл. Дано простое аналитическое решение модели резистивного переключения мемристора в случае сильного электрического поля (тонкий слой, большое приложенное напряжение), когда можно пренебречь градиентами концентраций заряженных частиц. Полученное решение позволит сократить время моделирования процессов обработки информации в больших мемристорных массивах. Показано совпадение участков вольт-амперной характеристики при переключении мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние, полученных в результате численного моделирования и экспериментально.

Третья глава посвящена математическому моделированию работы входного устройства нейропроцессора в режиме кодирования двоичного числа в частоту импульсов популяций из трех виртуальных нейронов.

Представлены алгоритм и соответствующая программа автоматического построения электрической схемы входного кодирующего устройства биоморфного нейропроцессора на основе логической матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром.

Представлен алгоритм моделирования работы больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары, и реализация этого алгоритма в виде

проблемно-ориентированной программы MDC-SPICE, необходимые для демонстрации работоспособности входного кодирующего и выходного декодирующего устройств нейропроцессора. Этот алгоритм моделирования и соответствующая программа созданы на основе известной программы SPICE и включают уточнённые математические модели мемристора и селективного элемента диода Зенера, а также представленный во второй главе алгоритм моделирования резистивного переключения мемристора.

Представлен алгоритм и соответствующая программа автоматического построения электрической схемы входного кодирующего устройства и с помощью математического моделирования в программе MDC-SPICE показана его работоспособность.

Четвертая глава посвящена математическому моделированию выходного устройства нейропроцессора, которое декодирует импульсы от нейронного блока в стандартный двоичный код. Представлены алгоритм и программа автоматического построения электрической схемы декодирующего устройства на основе логической матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром и показана с помощью математического моделирования в программе MDC-SPICE работоспособность выходного устройства нейропроцессора.

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

Новизна полученных результатов

Диссертационная работа обладает научной новизной. К наиболее значимым полученным результатам следует отнести: 1) алгоритмы для математического моделирования процесса резистивного переключения мемристора и процессов обработки информации в виде импульсов и двоичного кода в больших мемристорно-диодных массивах, содержащихся во входном кодирующем и выходном декодирующем устройствах биоморфного нейропроцессора; 2) сертифицированный программный комплекс, разработанный на основе этих алгоритмов, который предназначен для моделирования работы отдельных элементов мемристоров и мемристорно-диодных массивов в биоморфном нейропроцессоре; 3) результаты математического моделирования процесса резистивного переключения мемристора и процессов обработки информации в больших мемристорно-диодных массивах, подтверждающие работоспособность входного кодирующего и выходного декодирующего устройств биоморфного нейропроцессора.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Созданный комплекс программ имеет научную значимость, поскольку позволяет проводить математическое моделирование при разработке и исследовании электрических свойств отдельных мемристоров и их массивов, необходимое для оптимизации параметров кроссбар-матриц.

Этот комплекс программ позволяет проводить имитационное моделирование обработки информации в отдельных устройствах нейропроцессора и демонстрировать их работоспособность на стадии проектирования соответствующих электрических схем, поиска схемотехнических решений и исследования протекающих в этих схемах физических процессов.

Результаты математического моделирования необходимы для анализа и сравнения с результатами, которые будут получены при тестировании изготовленных лабораторных и промышленных образцов отдельных устройств и полной электрической схемы биоморфного нейропроцессора.

Достоверность и обоснованность проведенных исследований обеспечивается использованием известных математических методов для построения алгоритмов моделирования; взятием за основу известного симулятора SPICE, а также согласием представленных результатов с экспериментальными данными и результатами, полученными на основе известных математических моделей, которые описывают физические процессы, протекающие в твердотельных мемристорах.

Публикация результатов в ведущих профильных рецензируемых журналах и апробация на международных научных конференциях свидетельствуют о их достаточной обоснованности.

Соответствие паспорту специальности

Представленные в диссертационной работе алгоритмы моделирования и соответствующая программно-вычислительная реализация, результаты по математическому моделированию физических процессов, протекающих в твердотельном мемристоре и в мемристорных массивах на его основе, соответствуют следующим пунктам специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

- Пункт 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
- Пункт 5. Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента или на основе анализа математических моделей.
- Пункт 8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Замечания по содержанию диссертации

1. Отсутствуют пояснений к рис. 2.2, в частности, почему результаты аналитического расчета отличаются от численного расчета?

2. На рис. 2.6 представлены расчетные кривые только правой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) мемристора. Диссертант объясняет это тем, что для программирования мемристоров в больших мемристорных кроссбарах (при задании их резистивных состояний) используется только правая ветвь ВАХ. Однако, левая ветвь ВАХ отвечает за переключение мемристора из состояния ON в состояние OFF и также используется при моделировании работы мемристора.

3. Отсутствуют четкие требования к параметрам оксидных мемристоров для использования их в качестве синапсов при построении биоморфного нейропроцессора на базе мемристорно-диодных кроссбаров. Моделировалась ли численно пластичность мемристоров по биоподобному правилу типа STDP (spike-timing-dependent plasticity)?

4. Известным недостатком оксидных мемристоров является вариативность (разброс) их параметров от устройства к устройству (D2D) и при резистивных переключениях (РП) от цикла к циклу (C2C). Есть ли возможность в рамках представленной в диссертации численной модели РП включить эффекты стохастичности для описания вариативности C2C мемристоров? Моделировалось ли влияние, например, разброса в напряжениях переключения на точность распознавания паттернов с помощью рассмотренного биоморфного нейропроцессора?

Заключение по диссертационной работе

Отмеченные недостатки и замечания не влияют на общую положительную оценку работы и не снижают ее высокого научного уровня. Важной ее особенностью является комплексность проведенных исследований. В диссертации представлены результаты математического моделирования резистивного переключения в отдельной мемристорной структуре на основе оксида металла, а также моделирования процессов обработки информации на базе больших мемристорных массивов, которые могут быть востребованы при разработке перспективных нейроморфных мемристорных систем с оптимальными параметрами.

Диссертация Ибрагима Абдуллы Хайдара Абдо «Математическое моделирование процессов резистивного переключения в мемристоре и обработки информации в мемристорно-диодных кроссбарах входного и выходного устройств биоморфного нейропроцессора», является актуальной и законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. Оформление диссертационной работы и автореферата соответствует требованиям

ВАК. Автореферат соискателя в полной степени отражает положения и выводы, содержащиеся в диссертации.

Считаю, что диссертация Ибрагима А.Х.А. полностью отвечает требованиям пункта 9 «Положения о присуждении учёных степеней», постановления Правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник

Лаборатории технологии искусственного интеллекта

ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

 В.В. Рыльников
15 февраля 2023 г.

ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

тел. +7(499) 196-71-00 (доб.32-93)

e-mail: vvrylkov@mail.ru; rylkov_vv@nrcki.ru

Подпись Рылькова Владимира Васильевича заверяю:

Главный ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»



 К.Е. Борисов