

На правах рукописи



ИБРАГИМ АБДУЛЛА ХАЙДАР АБДО

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В МЕМРИСТОРЕ И
ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В МЕМРИСТОРНО-ДИОДНЫХ
КРОССБАРАХ ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО УСТРОЙСТВ
БИОМОРФНОГО НЕЙРОПРОЦЕССОРА**

**Специальность: 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Тюмень – 2022

Работа выполнена на кафедре прикладной и технической физики Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет» (ФГАОУ ВО «ТюмГУ»)

Научный руководитель: **Удовиченко Сергей Юрьевич**,
доктор физико-математических наук,
доцент, ФГАОУ ВО «Тюменский
государственный университет»

Официальные оппоненты: **Рыльков Владимир Васильевич**,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

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»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «**Владимирский
государственный университет** имени
Александра Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых»

Защита состоится «15» марта 2023 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.418.03 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, ауд. 410.

Тел.: 89091939210

E-mail: abdulla.ybragim@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре ФГАОУ ВО «ТюмГУ» и на сайте: <https://diss.utmn.ru/sovnet/diss-sovet-212-274-14/zashchita/1139351/>

Автореферат разослан « » января 2023 г.

*Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.418.03, к.т.н., доцент*



А. А. Оленников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время осуществлена разработка уникального биоморфного нейропроцессора на основе мемристорно-диодного кроссбара, реализующего аппаратную биоморфную импульсную нейросеть с большим числом нейронов для традиционных задач обработки информации, в том числе распознавания паттернов в видео и аудио информации, а также для воспроизведения работы кортикальной колонки мозга или её фрагмента [Pisarev A.D., Busygin A.N., Udovichenko S.Yu., Maevsky O.V. A biomorphic neuroprocessor based on a composite memristor-diode crossbar // *Microelectronics Journal*. 2020. V.102. Article 104827]. Уникальность биоморфного нейропроцессора состоит в том, что он построен на основе развитой электрической биоморфной модели нейрона и является биоморфным еще и с точки зрения выполнения функций биоморфной нейросети, созданной на основе оригинальной программной биоморфной модели нейрона. Впервые продемонстрирована генерация новой ассоциации (нового знания) при обработке импульсов в изготовленном мемристорно-диодном кроссбаре аппаратной импульсной нейросети процессора в отличие от ассоциативного самообучения в существующих аппаратных нейросетях с синапсами на базе дискретных мемристоров.

Биоморфный нейропроцессор качественно отличается от существующих нейропроцессоров на простых нейронах, предназначенных для работы компьютерного зрения, машинного обучения и других систем со слабым искусственным интеллектом. Поступление новой неизвестной информации в биоморфном нейропроцессоре можно отождествлять с генерацией новых ассоциаций и при совершенствовании его биоморфной нейросети научиться осмысливать эту информацию и, следовательно, совершить переход от слабого к сильному искусственному интеллекту.

В качестве ключевых узлов аппаратной части нейропроцессора используются сверхбольшие запоминающая и логическая матрицы, представляющие собой массив мемристорных синапсов и задающие вес и маршрут связи между нейронами соответственно. В составе нейропроцессора имеются также входное кодирующее и выходное декодирующее устройства, построенные с помощью универсальной логической матрицы на основе комбинированного мемристорно-диодного кроссбара.

Для демонстрации работоспособности высокопроизводительных систем обработки информации с помощью больших мемристорных массивов необходимо разработать достаточно простой алгоритм и проблемно-ориентированную программу моделирования процесса переключения резистивных состояний мемристора на основе анализа математической модели тепломассопереноса зарядов в электрическом поле мемристорного слоя. Такой алгоритм моделирования важен для программирования резистивных состояний мемристоров в больших матрицах, а также при реализации ассоциативного самообучения аппаратной нейросети

нейропроцессора, построенной на основе запоминающей матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром.

Поскольку биоморфный нейропроцессор является аппаратной реализацией импульсной нейросети, необходимо преобразовать поступающую информацию из набора чисел в импульсы, а выходящую, наоборот, из импульсов в двоичный код. Для автоматизированного построения электрических схем входного и выходного устройств нейропроцессора с помощью сверхбольших логических матриц на основе мемристорно-диодного кроссбара необходима разработка соответствующих алгоритмов моделирования и специальных программ. Для последующего имитационного моделирования работы этих устройств необходима специализированная программа расчета больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары, а также создание программного модуля для визуализации результатов расчетов.

Целью диссертационной работы является создание алгоритмов моделирования и на их основе комплекса проблемно-ориентированных программ, предназначенных для вычислительных экспериментов по имитационному моделированию процессов переключения резистивных состояний мемристора, а также обработки информации в кодирующем и декодирующем устройствах биоморфного нейропроцессора, включающих логическую матрицу с комбинированным мемристорно-диодным кроссбаром.

Задачи работы:

1. Построить итерационный алгоритм и создать проблемно-ориентированную программу для моделирования процесса резистивного переключения мемристора на основе анализа полной математической модели процессов стационарного теплопереноса кислородных вакансий и ионов.

2. Провести вычислительный эксперимент по имитационному моделированию процесса резистивного переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние.

3. Построить алгоритм и создать проблемно-ориентированную программу MDC-SPICE (Memristor-Diode Crossbar - Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) для имитационного моделирования работы больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары.

4. Разработать алгоритмы и соответствующие программы автоматического построения электрических схем входного и выходного устройств нейропроцессора, включающих логическую матрицу с мемристорно-диодным кроссбаром, а также программу для визуализации результатов расчета, полученных с помощью симулятора MDC-SPICE.

5. Провести вычислительный эксперимент по имитационному моделированию в программе MDC-SPICE работы входного устройства в режиме кодирования двоичного числа в частоту импульсов популяцией из трех нейронов и работы выходного устройства в режиме декодирования поступающих от нейронов импульсов в двоичный формат.

Научная новизна.

1. Разработаны итерационный алгоритм и на его основе проблемно-ориентированная программа для математического моделирования процесса резистивного переключения мемристора с применением метода конечных разностей, построенные на основе анализа полной математической модели процессов стационарного теплопереноса кислородных вакансий и ионов, включающей их генерацию, рекомбинацию, диффузию и дрейф в электрическом поле в структуре металл-оксид-металл при доминирующем транспортном механизме туннелирования электронов через кислородные вакансии.

2. Разработаны алгоритм и проблемно-ориентированная программа MDC-SPICE (Memristor-Diode Crossbar - Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) на основе известного симулятора SPICE и уточнённых математических моделей мемристора и селективного элемента диода Зенера для имитационного моделирования работы больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары. Одной из подпрограмм MDC-SPICE является разработанная программа для моделирования процесса резистивного переключения мемристора.

3. Разработаны алгоритмы и соответствующие программы автоматического построения электрических схем входного кодирующего и выходного декодирующего устройств биоморфного нейропроцессора, включающих логическую матрицу с комбинированным мемристорно-диодным кроссбаром, а также программа для визуализации результатов расчета, полученных с помощью симулятора MDC-SPICE.

4. С помощью имитационного моделирования в программе MDC-SPICE показана работоспособность входного устройства нейропроцессора в режиме кодирования двоичного числа в частоту импульсов популяцией из трех нейронов и выходного устройства нейропроцессора, проводящего декодирование поступающих от нейронов импульсов в двоичный формат.

5. Создан и сертифицирован программный комплекс, предназначенный для математического моделирования работы отдельных элементов – мемристоров и мемристорно-диодных массивов в нейропроцессоре и включающий: «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 13.07.21; «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.

Научная и практическая значимость результатов работы

Научная значимость заключается в разработке эффективных проблемно-ориентированных программ для моделирования процесса резистивного переключения мемристора, процессов обработки информации в больших мемристорно-диодных массивах, а также программ автоматического построения электрических схем входного кодирующего и выходного декодирующего устройств. Моделирование процесса переключения мемристора из низкопроводящего состояния в высокопроводящее важно для начального программирования резистивных состояний мемристоров в больших матрицах, а также при реализации ассоциативного самообучения аппаратной нейросети нейропроцессора, построенной на основе запоминающей матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром.

Созданный комплекс программ может быть использован для эффективного решения инженерно-технической задачи создания биоморфного нейропроцессора, требующей имитационного моделирования процессов программирования мемристоров и обработки информации в отдельных устройствах процессора, построенных на основе больших мемристорно-диодных массивах и требующих оптимизации их параметров.

Результаты по разработке программных продуктов, обеспечивающих моделирование процессов обработки информации в биоморфном нейропроцессоре, реализующего аппаратную импульсную нейросеть, востребованы при проектировании его прототипа совместно с АО НИИ Молекулярной Электроники (НИИМЭ) – головного предприятия приоритетного технологического направления «Электронные технологии» РФ и изготовлении на предприятии ПАО «Микрон», г. Москва, Зеленоград.

Материал, представленный в диссертации, используется в образовательном процессе Физико-технического института ТюмГУ: лекции и практические занятия для бакалавриата по курсу «Основы микроэлектроники» и в рамках подготовки аспирантов по курсам «Приборы на базе наноструктур и физические принципы их работы».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Итерационный алгоритм, построенный с помощью метода конечных разностей, и проблемно-ориентированная программа для моделирования процесса резистивного переключения мемристора на основе анализа полной математической модели процессов стационарного теплопереноса кислородных вакансий и ионов.

2. Алгоритм и проблемно-ориентированная программа MDC -SPICE

3. для имитационного моделирования работы больших электрических схем с мемристорно-диодными кроссбарам, которые построены на основе известного симулятора SPICE и включают уточнённые математические модели мемристора и селективного элемента диода Зенера, а также алгоритм моделирования резистивного переключения мемристора.

4. Алгоритмы и соответствующие программы автоматического построения электрических схем входного кодирующего и выходного декодирующего устройств биоморфного нейропроцессора, включающих универсальную логическую матрицу

с мемристорно-диодным кроссбаром, а также программа для визуализации результатов расчета, полученных с помощью симулятора MDC-SPICE.

5. Результат вычислительного эксперимента по моделированию процесса резистивного переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние, совпадающий с экспериментальными данными.

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

7. Созданный и сертифицированный программный комплекс, предназначенный для моделирования работы отдельных элементов – мемристоров и мемристорно-диодных массивов в биоморфном нейропроцессоре и включающий: программу для расчетов резистивных состояний и переключения мемристора; программу MDC-SPICE для моделирования работы больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары; программы для автоматического построения электрических схем входного и выходного устройств нейропроцессора, а также программу для визуализации результатов расчета, полученных с помощью симулятора MDC-SPICE.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных в работе результатов по численному моделированию мемристора и больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары с помощью программы MDC-SPICE, обеспечена взятием за основу известного симулятора SPICE, использованием измеренных характеристик изготовленного мемристора и согласием расчетных результатов с экспериментальными данными.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международных и Всероссийских конференциях в том числе:

- Всероссийская конференция молодых ученых «Математическое и информационное моделирование». Тюмень. ТюмГУ. 2021, 2020.
- II Международная научная-техническая конференция «Smart Energy Systems 2021» (SES-2021) Секция «Цифровые технологии, системы искусственного интеллекта, компьютерное моделирование» Казань. КГЭУ. 2021.
- Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Математика и междисциплинарные исследования». Пермь. 2021, 2020.
- XV Всероссийская открытая молодежная научная-практическая конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике». Казань. 2020.
- Международная научная конференция. применение технологий виртуальной реальности и смежных информационных систем в междисциплинарных задачах FIT-M 2020. МГУ. Москва.
- Международная молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения». Казань. КГЭУ. 2019.

Большая часть исследований диссертационной работы, касающаяся разработки и математического моделирования работы входного и выходного устройств нейропроцессора, поддержана грантом РФФИ в рамках научного проекта №20-37-90003 «Моделирование физических процессов в мемристорно-диодных кроссбарах входного и выходного блоков нейропроцессора».

Публикации

По результатам диссертационного исследования опубликованы 20 работ, в том числе 7 работ в изданиях, проиндексированных базами данных Web of Science, Scopus и включённых в Перечень ВАК РФ, получено 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

Материалы диссертационной работы обсуждались на 8 конференциях, из них 3 – международного и 5 – всероссийского уровней.

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. Автор принимал участие в написании статей для публикации в журналах и участвовал в качестве докладчика в конференциях по теме диссертационной работы.

Автор выражает благодарность научному руководителю, а также коллегам из НОЦ «Нанотехнологии» за помощь в проведении исследований и обсуждении полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Объем диссертации составляет 101 страниц машинописного текста, включая 42 рисунка. Список используемой литературы содержит 88 источников.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и основные задачи, показана научная новизна и научная и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора в получении результатов работы, приводятся сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

В первой главе приведен обзор существующих математических моделей, описывающих процесс резистивного переключения мемристоров с активным слоем оксида металла, основанного на физических процессах переноса зарядов в электрическом поле. Рассмотрены компактные схемотехнические

модели, и представляющие реальную структуру мемристора в виде эквивалентной схемы и характеризующиеся достаточно простыми вычислениями с помощью систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассмотрены мемристорные массивы, которые могут использоваться при разработке входного устройства, кодирующего информацию в импульсы, и выходного устройства нейорпроцессора, декодирующего импульсы от нейронной сети в двоичный код.

Вторая глава посвящена выбору 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 выбору математической модели резистивного переключения мемристора.

В общем виде систему уравнений тепломассопереноса при транспорте кислородных вакансий и ионов в электрическом поле оксидного слоя мемристора можно записать следующим образом [1,2]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial N}{\partial z} - NV_E \right) + G(N) - R(N, N_{ox}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(SDN \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_{ox}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ox} \frac{\partial N_{ox}}{\partial z} + N_{ox} V_{Eox} \right) + G(N) - R(N, N_{ox}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(S_{ox} D_{ox} N_{ox} \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(N) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + J \cdot E - G(N)E_g + R(N, N_{ox})E_r, \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где приняты следующие обозначения:

$$D = \frac{1}{2} a_0^2 f_0 \exp \left(-\frac{E_{avac}}{kT} \right) \cosh \left(\frac{Eq a_0}{2kT} \right) - \text{коэффициент диффузии вакансий};$$

$$V_E = a_0 f_0 \exp \left(-\frac{E_{avac}}{kT} \right) \sinh \left(\frac{Eq a_0}{2kT} \right) \left(1 - \frac{N}{N_m} \right) - \text{полевая скорость вакансий};$$

$$D_{ox} = \frac{1}{2} a_0^2 f_0 \exp \left(-\frac{E_{aiox}}{kT} \right) \cosh \left(\frac{Eq a_0}{2kT} \right) - \text{коэффициент диффузии ионов};$$

$$V_{Eox} = a_0 f_0 \exp \left(-\frac{E_{aiox}}{kT} \right) \sinh \left(\frac{Eq a_0}{2kT} \right) \left(1 - \frac{N_{ox}}{N_m} \right) - \text{дрейфовая скорость ионов};$$

$$G = (N_{max} - N) f_0 \exp \left(-\frac{E_g - \sqrt{\frac{q^3 E}{\pi \epsilon \epsilon_0}}}{kT} \right) - \text{скорость генерации пар Френкеля};$$

$$R = NN_{ox} V_{Eox} \sigma_{ox} - \text{скорость рекомбинации ионов с вакансиями};$$

$$\sigma_{ox} = \frac{q}{4\epsilon \epsilon_0 E} - \text{сечение рекомбинации, } N_{max} - \text{максимальное число вакансий,}$$

$$E - \text{электрическое поле, } J - \text{плотность тока захваченных электронов, } a_0 =$$

$$N_{max}^{-\frac{1}{3}} - \text{длина прыжка для частицы, } q - \text{заряд частицы (иона или вакансии),}$$

$$k - \text{постоянная Больцмана, } T - \text{температура, } f_0 = \frac{W_{ph}}{h} - \text{частота колебаний}$$

кристаллической решетки, W_{ph} – энергия фононов, h – постоянная Планка; E_{avac} и E_{aox} – соответственно энергия активации движения вакансий и ионов кислорода, E_{gi} – ширина запрещенной зоны диэлектрика, E_g и E_r – соответственно энергия генерации и рекомбинации пары вакансии и иона; λ – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность оксида металла, c – удельная теплоемкость диэлектрика; $S = -E_{avac}/kT^2$ и $S_{ox} = -E_{aox}/kT^2$ – соответственно коэффициенты термофореза для вакансий и ионов; z – координата, направленная поперек оксидного слоя мемристора. Экспериментальное исследование механизма рождения пары Френкеля, характерного для оксидов переходных металлов (Ti, Hg), указывает на близкие значения энергии активации для этой группы оксидов [Abdelouahed S., McKenna K.P. Relevance of non-equilibrium defect generation processes to resistive switching in TiO₂ // Journal of applied physics 2015. V.118. Article 134103]. Включение в уравнения (1) и (2) диффузионных членов, определяемых градиентами концентраций dN/dz ; dN_{ox}/dz и отсутствующих в [6], не позволяет свести эти уравнения к одному уравнению для концентрации вакансий N , учитывающего рекомбинацию вакансий с ионами.

Основные допущения, упрощающие математическую модель процессов тепломассопереноса зарядов, связаны с решением уравнений (1)–(4) в стационарном режиме. Для оксида гафния, при времени миграции кислородных вакансий $t_0 \approx 10^{-6}$ с через оксид их концентрация выходит на постоянное значение за время $t = 0,1$ мс, а время переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние порядка 10^{-1} мс. Следовательно, уравнения (1) и (2), определяющие концентрации ионов и вакансий, можно рассматривать в стационарном режиме. Использование стационарного уравнения тепломассопереноса (3) оправдано, поскольку время выхода температуры оксидного слоя на постоянное значение составляет менее 0,1 нс. В правой части этого уравнения кроме члена, связанного с джоулевым нагревом из-за протекания тока присутствуют члены, связанные с охлаждением оксида за счет генерации пар вакансия-ион и нагревом диэлектрика при их рекомбинации. В уравнениях непрерывности для вакансий и ионов (1), (2) можно не учитывать члены, связанный с термофорезом и пропорциональные градиенту температуры, когда мал диапазон изменения температуры по толщине мемристора.

И, наконец, из-за малой электропроводности диэлектрического оксида металла доминирующим транспортным механизмом электронов в слое оксида металла является туннелирование через кислородные вакансии. В этом случае внешнее электрическое поле E незначительно искажается свободными и захваченными носителями заряда, и его распределение в диэлектрическом слое определяется с помощью стационарного уравнения Лапласа. Решением этого уравнения является $E = d\phi/dz = -u/d$, где $\phi|_{z=0} = 0$; $\phi|_{z=d} = u$, d – толщина оксидного слоя, u – потенциал электрода.

Граничные условия первого рода на положительно заряженном электроде ($z=d$) для дифференциальных уравнений второго порядка (1),(2) следующие:

$$N(d) = N_{ox}(d) = N_0 = N_{max} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \quad (5)$$

где N_0 – равновесная концентрация дефектов по Френкелю в диэлектрике в отсутствие электрического поля. Граничными условиями второго рода для этих уравнений на заземленном электроде ($z=0$) являются равенства нулю плотности потоков вакансий и ионов:

$$D \frac{dN}{dz} - NV_E = 0 \text{ и } D_{ox} \frac{dN_{ox}}{dz} + N_{ox} V_{Eox} = 0. \quad (6)$$

На обоих электродах мемристора $T|_{z=0,d} = T_0$, а на границе диэлектрик – электрод изменения температур и теплового потока равны нулю:

$$[T|_{z=0,d}] = 0; \quad [\lambda \frac{dT}{dz}|_{z=0,d}] = 0. \quad (7)$$

Для исследования вольт-амперной характеристики мемристора к упрощенной модели тепломассопереноса зарядов необходимо добавить математическую модель его резистивного переключения из низкопроводящего в высокопроводящее состояние, включающую уравнение для плотности тока захваченных электронов J [1,6]:

$$J = \frac{e}{a^2} \frac{n_t}{N} \left(1 - \frac{n_t}{N}\right) P_{tun}, \quad (8)$$

частоту туннелирования электронов между фонон-связанными ловушками имеет экспоненциальную зависимость от электрического поля и температуры

$$P_{tun}(E, T) = \frac{2\sqrt{\pi}\hbar W_t}{m^* a^2 Q_0 \sqrt{kT}} \exp\left(-\frac{W_{opt}-W_t}{2kT}\right) \exp\left(-\frac{2a\sqrt{2m^*W_t}}{\hbar}\right) \sinh\left(\frac{eaE}{2kT}\right), \quad (9)$$

и концентрацию захваченных в вакансии электронов, соответствующую в стационарных условиях статистике Ферми на контакте металл-диэлектрик:

$$n_t(z=0) = \frac{N}{1 + \exp\left(\frac{A_M - \chi_D - W_t}{kT}\right)}, \quad (10)$$

где $Q_0 = \sqrt{2(W_{opt} - W_t)}$, W_t и W_{opt} – термическая и оптическая энергия ионизации ловушки; m^* – эффективная масса носителя заряда; \hbar приведенная постоянная Планка, $a = N^{-1/3}$ – длина прыжка для электронов; A_M – работа выхода электрона из металла в вакуум, χ_D – электронное сродство в диэлектрике.

Аналитическая модель резистивного переключения мемристора реализуется в случае пренебрежения в (1), (2) диффузионными членами, определяемыми градиентами концентраций dN/dz ; dN_{ox}/dz . Это справедливо в условиях сильного электрического поля в мемристоре, когда диффузионным дрейфом зарядов можно пренебречь по сравнению с полевым. В результате сложения этих уравнений для концентрации вакансий имеем следующее нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка с переменным коэффициентом $C(z)$:

$$\frac{dN(z)}{dz} - \sigma_{ox}N^2(z) - C(z)[N_{max} - N(z)] = 0, \quad (11)$$

$$C(z) = \exp \left[\left(\sqrt{\frac{q^3 E(z)}{\pi \varepsilon \varepsilon_0}} - \frac{q^2}{\pi \varepsilon \varepsilon_0 a_0} \right) / kT \right] / a_0 \sinh \left(\frac{qE(z)a_0}{2kT} \right),$$

В приближении постоянного электрического поля $E = -d\varphi/dz = -u/d$ уравнение (3) с постоянным коэффициентом C для концентрации вакансий допускает аналитическое решение

$$N(z, u) = \frac{C(u)}{2\sigma_{ox}(u)} + \frac{D(u)}{2\sigma_{ox}(u)} \operatorname{tg} \left[\frac{D(u)}{2} (z - d) + \operatorname{arctg} \left(\frac{2\sigma_{ox}(u)N_{z=d} - C(u)}{D(u)} \right) \right], \quad (12)$$

где $D = \sqrt{4\sigma_{ox}N_0C - C^2}$.

Концентрация захваченных электронов с увеличением напряжения на электродах приближается к концентрации вакансий, что приводит к ограничению роста плотности тока (10) при напряжении, равном напряжению переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние. Вблизи напряжения переключения мемристора справедливо уравнение Лапласа для электрического поля (4). При меньших напряжениях вместо этого уравнения необходимо решать уравнение Пуассона для электрического поля, в правой части которого присутствует разность плотности зарядов вакансий и электронов $e(N - n_1)$.

Поскольку определение концентрации захваченных в ловушки электронов является сложной задачей, величину электрического поля можно определить из условия равенства диффузионного потока вакансий и их потока, обусловленного электрическим полем, т.е. при равновесном распределении вакансий:

$$E(z) = -\frac{d\varphi(z)}{dz} = \frac{T}{qN(z)} \cdot \frac{dN(z)}{dz}, \quad (13)$$

В такой постановке математической модели резистивного переключения мемристора ставится задача о численном решении дифференциального уравнения первого порядка с переменным коэффициентом $C(z)$ (11).

Искомый ток, который протекает через оксидный слой и измеряется на электроде с нулевым потенциалом (в месте эмиссии электронов), можно рассчитать аналитически с помощью выражений (8)–(12), определяя концентрации вакансий и инжектированных электронов у этого электрода с известной площадью. При численном расчете тока через мемристор для определения концентрации кислородных вакансий на границе электрода необходимо решать нелинейную систему уравнений (11) и (13).

Итерационный алгоритм моделирования процесса резистивного переключения мемристора с применением метода конечных разностей построен на основе анализа представленной полной математической модели процессов стационарного теплопереноса кислородных вакансий и

ионов. Схема этого алгоритма, представленного в [3] и описанного в [6], показана на рис.1.

Процедура расчета профиля вакансий кислорода при определенном напряжении на электродах состоит из трех этапов. В качестве начального приближения распределение вакансий вычисляется при постоянном электрическом поле по толщине оксидного слоя мемристора. Затем рассчитывается электрическое поле, соответствующее найденному скалярному полю вакансий. Далее, на основе полученного электрического поля вычисляется итоговый профиль концентраций вакансий по толщине пленки.

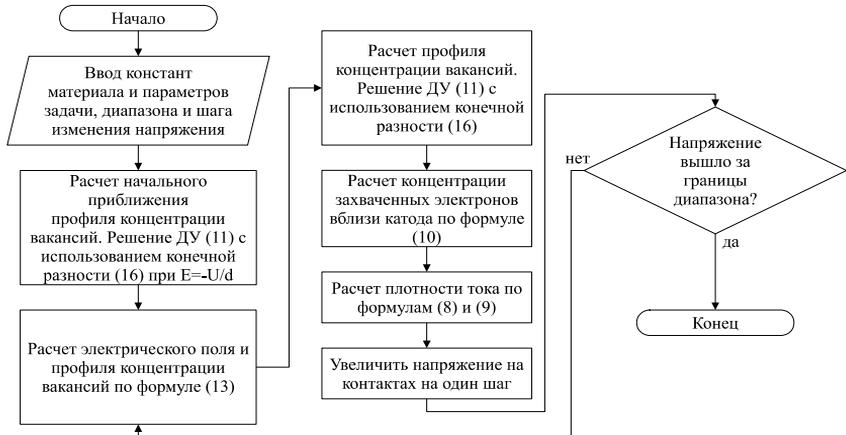


Рисунок 1 – Схема итерационного алгоритма моделирования процесса резистивного переключения мемристора

Расчет электрического поля, соответствующего определенному профилю вакансий кислорода, осуществляется с использованием формулы (13). При этом для численного вычисления производной концентрации вакансий по толщине слоя применяется двусторонняя конечная разность:

$$\left(\frac{dN}{dz}\right)_i = \frac{N_{i+1} - N_{i-1}}{z_{i+1} - z_{i-1}}, \quad i = 1..(M - 1). \quad (14)$$

На границах слоя диэлектрика, использованы соответствующие односторонние конечные разности:

$$\left(\frac{dN}{dz}\right)_0 = \frac{N_1 - N_0}{z_1 - z_0}, \quad \left(\frac{dN}{dz}\right)_M = \frac{N_M - N_{M-1}}{z_M - z_{M-1}}. \quad (15)$$

Скалярное поле концентраций вакансий рассчитывается путем численного решения задачи Коши для уравнения (11) методом Эйлера. Подставляя

одностороннюю конечную разность в уравнение (11) получим соответствующую итерационную формулу:

$$N_{i+1} = N_i + (z_{i+1} - z_i) \cdot (\sigma_{ox} N_i^2 + C(z_i) \cdot [N_{max} - N_i]). \quad (16)$$

Концентрация вакансий N_0 для начальной итерации соответствует концентрации вакансий в отсутствие электрического поля. Для уменьшения погрешности при численном расчете было выполнена процедура обезразмеривания путем следующих замен:

$$N = n \cdot N_{max}, \quad z = x \cdot d.$$

Плотность тока рассчитывается по формулам аналитической модели с использованием скорректированного значения электрического поля вблизи катода. Построение вольт-амперной характеристики выполняется путем последовательного расчета профиля вакансий и соответствующей плотности тока при разных напряжениях.

Алгоритм моделирования процесса резистивного переключения мемристора реализован в виде проблемно-ориентированной программы [16]. Программа составлена на языке программирования Python версии 3.7 с применением библиотеки numpy. Значения всех переменных были представлены типом numpy.double, который соответствует типу double в языке C. При расчетах использовалась расчетная сетка с равномерным расположением узлов.

В результате математического моделирования процесса резистивного переключения мемристора [6, 15] при решении уравнения (11) с постоянным и переменным коэффициентом C получены распределения концентрации кислородных вакансий по толщине пленки оксида гафния HfO_2 в мемристоре (рис.2а). На рис.2б представлены расчетные и экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) для структуры $\text{Pt/HfO}_2/\text{TiN}$, в которой толщина оксидного слоя 10 нм и площадь электродов $1 \times 1 \text{ мкм}^2$.

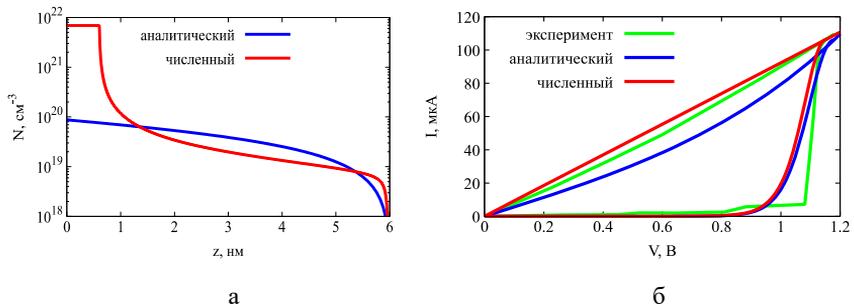


Рисунок 2 – Распределение концентрации вакансий по толщине пленки оксида гафния HfO_2 при температуре 313°C (а); совмещение ВАХ мемристора: в аналитическом расчете при 435°C и в численном при 313°C (б)

Распределение концентрации вакансий, полученное с помощью численного расчета (рис. 2а) хорошо интерпретирует физическую картину формирования филамента – области повышенной проводимости с характерной полочкой максимальной концентрации вакансий, которая с увеличением напряжения на правом электроде продвигается в его сторону.

Разработанные модели переключения мемристора позволяют определить температуру в мемристоре (рис.2б), при которой достигается совмещение площадей ВАХ и совпадение соответствующих параметров мемристора.

В случае моделирования полной математической модели тепломассопереноса кислородных вакансий и ионов [1, 2], включающей градиенты соответствующих концентраций, при программировании уравнений (1)–(4) и граничных условий (5)–(7) использованы следующие значения констант для мемристора на основе оксида тантала Ta_2O_5 : $N_m = 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $a = 0.05 \text{ нм}$, $E_{avac} = 0,7 \text{ эВ}$, $E_{aox} = 0,65 \text{ эВ}$, $E_g = 1,66625 \text{ эВ}$, $E_r = 0,15 \text{ эВ}$, $W_{opt} = 2,5 \text{ эВ}$, $W_t = 0,767 \text{ эВ}$, $m^* = 0,25m_e$. На рис.3 представлены результаты численного моделирования процессов стационарного массопереноса кислородных вакансий по толщине оксидного слоя мемристора при $d = 7,5 \text{ нм}$, $u = 1,5 \text{ В}$.

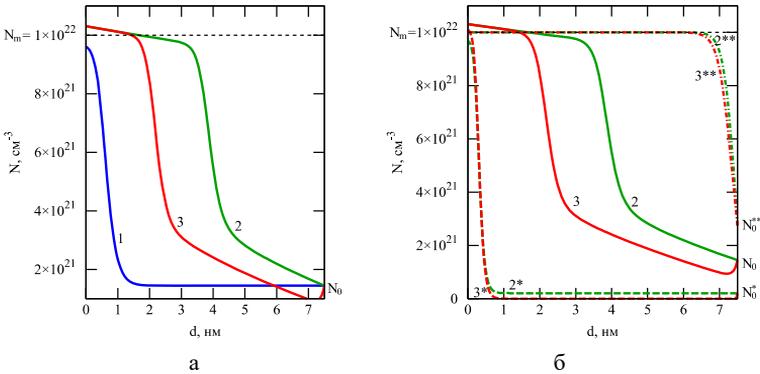


Рисунок 3 – Профиль концентрации вакансий по толщине оксидного слоя при диффузии в электрическом поле (1), с учетом генерации (2), с учетом генерации и рекомбинации с ионами (3); б – для различной температуры: 2 и 3 при 600⁰ К, 2* и 3* при 300⁰ К, 2** и 3** при 900⁰ К.

Рис. 4а иллюстрирует процесс резистивного переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние при возрастании напряжения u на электроде от 0 до 3В: красная кривая – результат расчета с учетом генерации и рекомбинации пар вакансия-ион, черная кривая взята из экспериментальной вольт-амперной характеристики для бесформовочного мемристора при отсутствии филаментов, в котором в качестве анода использовался электрод из тантала Ta диаметром $D = 100 \text{ мкм}$ и соответствующие константы для этого материала: работа выхода $A_M = 4,25 \text{ эВ}$, средство электрона в оксиде тантала $\chi_D = 3,2 \text{ эВ}$.

Уравнение (3), описывающее процесс теплопереноса при движении вакансий в электрическом поле, в стационарном режиме так же, как уравнения (1) и (2), решалось методом конечных разностей с использованием сетки с равномерным расположением узлов.

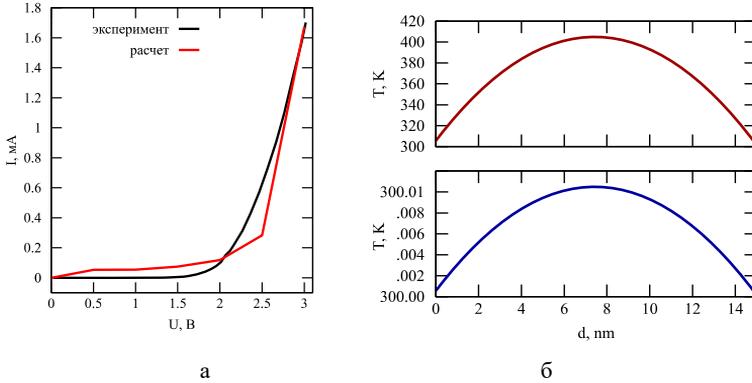


Рисунок 4 – Зависимость тока $I = J\pi D^2/4$ от напряжения u на аноде, описывающая переключение мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние (а); распределение температуры по толщине оксидного слоя при плотностях тока $2.16 \cdot 10^5$ A/m² (синяя кривая) и $2.16 \cdot 10^9$ A/m² (красная кривая)

На рис. 4б представлено рассчитанное распределение температуры по толщине оксидного слоя при джоулевом нагреве для бесформовочного мемристора на основе оксида тантала. Для простоты расчетов кривые температуры получены с использованием концентрации вакансий, найденных при средней температуре 300K. То есть выполнена одна итерация перерасчета температуры. В качестве граничных условий для уравнения теплопроводности была зафиксирована температура 300K на внешних границах проводников. Толщина TiN анода 20 нм, Ta катода – 100 нм. Как следует из рис.4 (синяя кривая) для бесформовочного мемристора вследствие низкой плотности электронного тока, текущего через электрод большой площади, и, соответственно, слабого джоулева нагрева, градиент температуры практически отсутствует. Поэтому расчет распределения концентрации вакансий и вольт-амперной характеристики в бесформовочном мемристоре в предположении заданной и постоянной по толщине температуры оправдан. Красная кривая была получена в предположении формовочного режима при длительном приложении надпорогового напряжения ($u = 3$ В), когда происходит обеднение ионами кислорода в активном слое мемристора и увеличение концентрации вакансий, что приводит к росту плотности электронного тока. В обоих случаях объемные источники тепла от процессов генерации и рекомбинации пар ион-вакансия оказываются пренебрежимо малы.

В третьей главе представлены алгоритм моделирования больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары [3], и реализация этого алгоритма в виде проблемно-ориентированной программы MDC-SPICE [4, 10] с помощью уточнённых математических моделей мемристора и селективного элемента диода Зенера, а также с помощью представленного во второй главе алгоритма моделирования процесса резистивного переключения мемристора. Получено свидетельство о регистрации программы [17]. Этот симулятор является модифицированной версией SPICE подобного симулятора Ahkab. Электрическая схема в классической программе SPICE задается как набор элементов электроники и связей между ними. Схема алгоритма моделирования больших мемристорно-диодных массивов представлена на рис. 5.

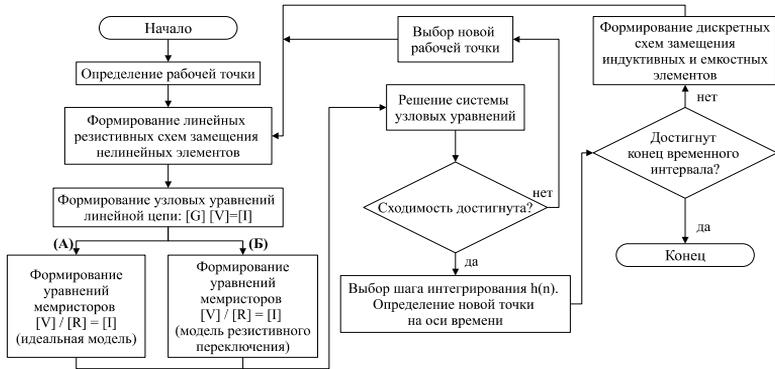


Рисунок 5 – Схема алгоритма моделирования больших мемристорно-диодных массивов

Набор элементов электроники включает SPICE модели транзисторов, диодов и т.д. Согласно варианту (А) на рис.5 в алгоритм программы SPICE, предназначенной для моделирования работы больших электрических схем, добавлена идеальная математическая модель мемристора, в которой изменения параметра состояния дополнительно были жестко зафиксированы в интервале от 0 до 1. Такое ограничение необходимо, поскольку неабсолютная точность рациональных чисел в компьютерной системе приводит к выходу параметра состояния за границы допустимого интервала и, как следствие, к неправильной работе модели. Кроме этого с целью ускорения расчета нелинейная вольт-амперная характеристика, используемая в классической SPICE модели диода Зенера, была упрощена и представлена в виде трех прямых линий. Таким образом, симулятор заменяет диод резистором с соответствующим значением сопротивления. Вносимая при этом упрощении ошибка мала, когда мемристорно-диодный кроссбар работает в цифровом режиме, и напряжение на диодах Зенера не приближается к пороговым значениям открытия и обратного пробоя диода. Согласно варианту (Б) на рис.5 в алгоритм моделирования работы

больших электрических схем в программе SPICE включен блок алгоритма моделирования процесса резистивного переключения мемристора.

Программа визуализации результатов моделирования работы электрических схем [4] использует выходной файл расчета MDC-SPICE, который организован в виде колонок с данными. Программа визуализации написана на языке Python 3 и использует библиотеки `numpy` и `matplotlib`. Она считывает файл построчно и формирует соответствующие массивы значений типа `numpy.array`. Первый массив значений является основным и всегда содержит временные значения. Построение изображения осуществляется с помощью модуля `ruplot` из библиотеки `matplotlib`, которому передаются массивы значений, выбранные для отображения на картинке. По умолчанию в качестве оси абсцисс используется время, но на усмотрение пользователя может быть выбран любой другой параметр. Изображение на компьютере появляется в виде интерактивной формы с возможностью сохранения в файл. Получено свидетельство о регистрации программы визуализации [20].

Разработаны алгоритм (рис. 6) [3] и программа автоматического построения электрической схемы входного кодирующего устройства на основе логической матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром.

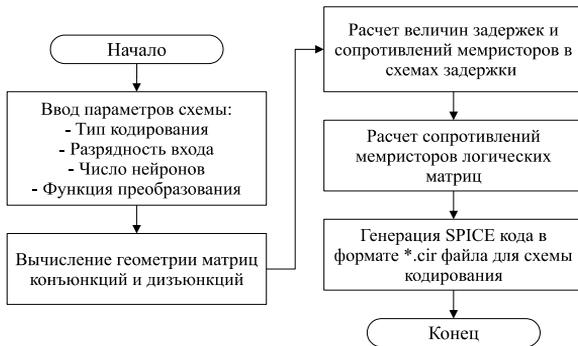


Рисунок 6 – Алгоритм автоматического построения электрической схемы входного кодирующего устройства

Программа создана из обработчика входных данных, подпрограммы синтеза электрической схемы и подпрограммы формирования выходного текстового файла [4,8,10]. Получено свидетельство на регистрацию этой программы [19]. Синтез электрической схемы выполняется программой на нескольких уровнях абстракции: сначала собираются элементарные цепи мемристор-диод, затем массивы этих цепей – кроссбары и затем кроссбары объединяются в совершенные дизъюнктивные нормальные формы (СДНФ). Каждая из СДНФ содержит одну матрицу конъюнкций и одну матрицу дизъюнкций. Результатом работы программы является текстовый файл, содержащий описание электрической схемы входного блока с использованием стандартного SPICE синтаксиса.

С помощью представленной программы построена электрическая схема импульсного кодирования информации, которая содержит одну СДНФ (рис. 7а).

На подтягивающие резисторы в матрице конъюнкций подаются импульсы с линий задержек (рис. 7б).

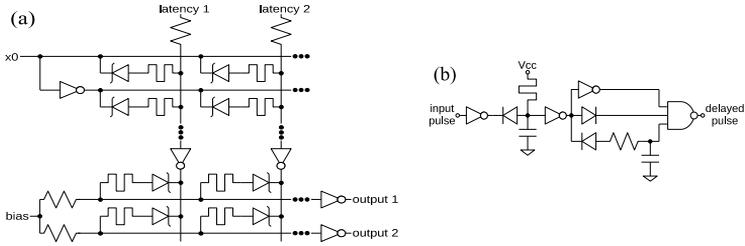


Рисунок 7 – Электрическая схема кодирующего устройства: а – реализация совершенной дизъюнктивной нормальной формы на базе мемристорно-диодного кроссбара, б – линия задержки

Для демонстрации работоспособности кодирующего устройства взят один из режимов кодирования информации, представляющей собой набор величин (яркости пикселей, амплитуды составляющих частот звукового сигнала) с определенными значениями – кодирование двоичного числа в частоту импульсов с помощью популяции из трех нейронов.

На рис. 8 приведены результаты моделирования в программе MDC-SPICE процесса кодирования числа n в частоту импульсов схемой (рис. 6) в режиме работы трех виртуальных нейронов (выходных каналов) [5, 11, 13].

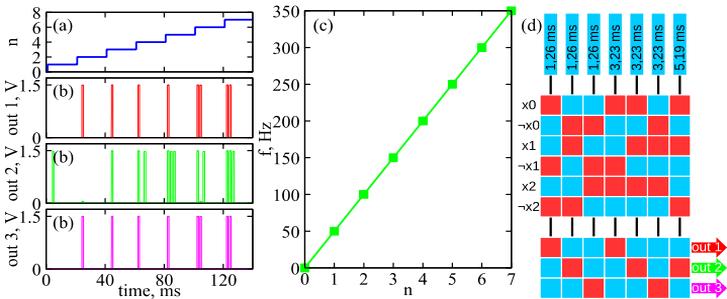


Рисунок 8 – Моделирование режима кодирования числа в частоту популяцией из трех нейронов: (а) изменение входного числа во времени; (б) выходные импульсы; (с) функция преобразования числа n в частоту f ; (д) карта проводимости мемристоров: красный цвет – высокая и синий цвет – низкая проводимости

Из рис. 8 следует, что суммарная частота импульсов на выходах пропорциональна входному числу. Моделирование процесса установки требуемых состояний мемристоров согласно карте проводимости производилось с использованием разработанной программы, моделирующей резистивное переключение мемристора.

Четвертая глава посвящена математическому моделированию выходного устройства, которое декодирует импульсы от нейронного блока в стандартный двоичный код. Для этого разработаны алгоритм [3] и программа автоматического построения электрической схемы кодирующего устройства на основе логической матрицы с мемристорно-диодным кроссбаром. Получено свидетельство на регистрацию этой программы [18].

Выходное устройство с помощью логической матрицы на основе комбинированного мемристорно-диодного кроссбара производит декодирование импульсов, поступающих из аппаратной нейронной сети, в двоичный код. В выходном устройстве объединены временной и пространственный способы модификации информации. Преобразование выходных импульсов от одного нейрона является модификацией во времени, а маршрутизация импульсов от популяции нейронов – модификацией в пространстве. Алгоритм автоматического построения выходного устройства (рис. 9) отличается от алгоритма для входного устройства только набором входных параметров.

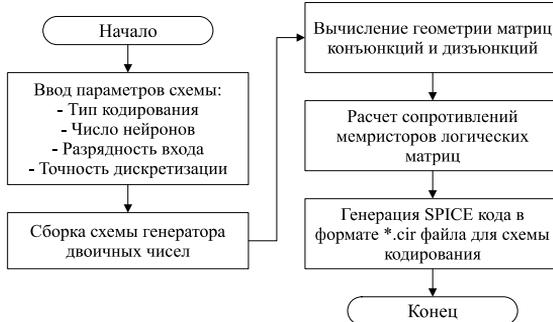


Рисунок 9 – Алгоритм автоматического построения электрической схемы выходного декодирующего устройства

Программа для автоматического построения электрической схемы выходного устройства также содержит три подпрограммы и отличается от программы построения входного устройства другим обработчиком входных данных и подпрограммой синтеза электрической схемы [4, 8].

В качестве тестового примера с помощью этой программы построена электрическая схема выходного устройства, выполняющая с помощью логической матрицы (рис.10) декодирование импульсов от нейронов в двоичный код с пространственно-временным преобразованием и сжатием [4, 7, 12]. Эта схема преобразует популяционно кодированное число в восьмеричное число, каждый разряд которого представлен бинарным кодом. Электрическая схема преобразователя реализуется в двух слоях логической матрицы. Величины задержки двух входных импульсов, приходящих из нейронной сети, декодируются в двухразрядное восьмеричное число, значения разрядов которого представлены трехбитными двоичными числами. Входные импульсы по линиям `input_0` и `input_1` подаются на шины первого слоя

матрицы. В этом слое выполняется поразрядное преобразование временных задержек импульсов в позиционный код. Во втором нижнем слое производится преобразование из позиционного кода в бинарный код. С помощью регистров и логических элементов «И», которые установлены на выходной периферии 3D логической матрицы, производится временная коррекция выходных импульсов.

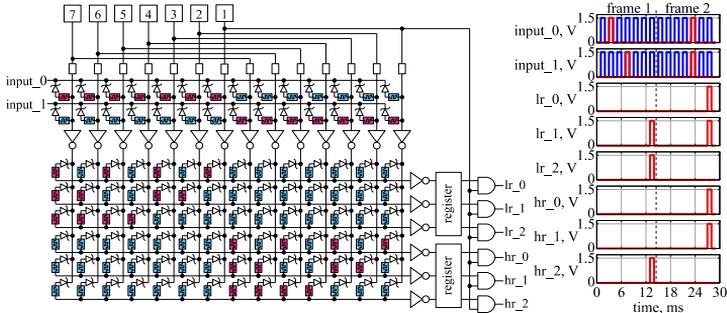


Рисунок 10 – Принципиальная электрическая схема декодирования популяционного двухразрядного импульсного сигнала в восьмеричный двухразрядный код и результаты её MDC-SPICE моделирования

Согласно диаграмме сигналов на рис. 9, входная информация в пространственно-временном формате подается в виде двух импульсов, что соответствует восьмеричному числу 33_8 (соответствует 27_{10}). После симуляции импульсы выходного числа остаются разделёнными по времени с разрядом нового значения, равным 35_8 (соответствует 29_{10}).

Таким образом в выходном устройстве нейропроцессора реализовано декодирование импульсов, поступающих от нейронного блока, в двоичный код с возможностью их пространственно-временного преобразования, которое является основой алгоритма сжатия. Информация в сжатом виде выводится из схемы нейропроцессора с помощью минимального количества выходных электрических линий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан итерационный алгоритм и проблемно-ориентированная программа для математического моделирования процесса резистивного переключения мемристора, построенные на основе анализа полной математической модели процессов стационарного теплопереноса кислородных вакансий и ионов, включающей их генерацию, рекомбинацию, диффузию и дрейф в электрическом поле в структуре металл-оксид-металл. Представлено простое аналитическое решение модели резистивного переключения мемристора в случае сильного электрического поля (тонкий слой, большое приложенное напряжение), когда можно пренебречь градиентами концентраций заряженных частиц. Такое решение позволят

сократить время моделирования процессов обработки информации в больших мемристорных массивах.

2. Показано совпадение участков вольт–амперной характеристики при переключении мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние, полученных в результате численного моделирования и экспериментально.

3. Разработаны алгоритм и проблемно-ориентированная программа MDC-SPICE для имитационного моделирования работы больших электрических схем с мемристорно-диодными кроссбарами, которые построены на основе известного симулятора SPICE и включают уточнённые математические модели мемристора и селективного элемента диода Зенера, а также алгоритм моделирования резистивного переключения мемристора.

4. Разработаны алгоритм и программа автоматического построения электрической схемы входного кодирующего устройства биоморфного нейропроцессора, включающей универсальную логическую матрицу с комбинированным мемристорно-диодным кроссбаром.

5. Показана с помощью имитационного моделирования в программе MDC-SPICE работоспособность входного устройства в режиме кодирования двоичного числа в частоту импульсов популяцией из трех нейронов. Моделирование процесса установки требуемых состояний мемристоров согласно карте проводимости производилось с использованием разработанной программы, моделирующей резистивное переключение мемристора.

6. Разработаны алгоритм и программа автоматического построения электрической схемы выходного декодирующего устройства биоморфного нейропроцессора, включающую универсальную логическую матрицу с комбинированным мемристорно-диодным кроссбаром.

7. Показана с помощью имитационного моделирования в программе MDC-SPICE работоспособность выходного устройства, проводящего декодирование поступающих от нейронов импульсов в двоичный формат.

8. Создан и сертифицирован программный комплекс, предназначенный для моделирования работы отдельных элементов – мемристоров и мемристорно-диодных массивов в биоморфном нейропроцессоре и включающий: программу для расчетов резистивных состояний и переключения мемристора; программу MDC-SPICE для расчета больших электрических схем, содержащих мемристорно-диодные кроссбары; программы для автоматического построения электрических схем входного и выходного устройств нейропроцессора, а также программу для визуализации результатов расчета, полученных с помощью симулятора MDC-SPICE.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ и входящих в международные базы данных:

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. DOI:10.1002/pssa.202200478 (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. (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. DOI:10.21684/2411-7978-2022-8-4-163-178. (ВАК РФ)

4. Ebrahim A.H., Udovichenko S. Yu. Automatic building of electrical circuits of biomorphic neuromorphic 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 neuromorphic 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. (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. (ВАК РФ)

Публикации в других изданиях:

8. Ибрагим А. Х., Удовиченко С. Ю. Программные модули для автоматического построения электрических схем блоков нейропроцессора // *Материалы всероссийской конференции молодых ученых «Математическое и информационное моделирование»*. Тюмень. 2021. С. 11-16.

9. Ибрагим А. Х., Бусыгин А. Н., Удовиченко С. Компьютерная симуляция биоморфного нейропроцессора // *Тезисы II Международной научно-технической конференции «Smart Energy Systems 2021» (SES-2021) Секция «Цифровые технологии, системы искусственного интеллекта, компьютерное моделирование»*. Казань, 2021. С.60.

10. Ибрагим А. Х., Удовиченко С. Ю. Автоматическое построение электрических схем блоков биоморфного нейропроцессора и визуализация результатов их численного моделирования // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Математика и междисциплинарные исследования*. Пермь, 2021. С. 55.

11. Ибрагим А. Х. Моделирование процессов кодирования информации в биоморфном нейропроцессоре // *Материалы XV Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике»*. Казань, 2020. С. 340-343.

12. Ибрагим А. Х. Моделирование процессов декодирования информации в биоморфном нейропроцессоре // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. «Математика и междисциплинарные исследования*. Пермь, 2020. С. 69-73.

13. Удовиченко С. Ю., Писарев А. Д., Бусыгин А. Н., Ибрагим А. Х. Компьютерная симуляция биоморфного нейропроцессора – носителя искусственного интеллекта // *Сборник тезисов международной научной конференции. Применение технологий виртуальной реальности и смежных информационных систем в междисциплинарных задачах FIT-M*. Москва, 2020. С. 14-20.

14. Ибрагим А. Х., Удовиченко С. Ю. Моделирование устройства кодирования информации для импульсной аппаратной нейросети // *Материалы всероссийской конференции молодых ученых «Математическое и информационное моделирование»*. Тюмень, 2020. Вып. 18. С. 10-16.

15. Ибрагим А. Х. Модель динамического переключения мемристора для обработки сигналов в цифровой логической матрице нейропроцессора // *Материалы международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения»*. Казань, 2019. Т. 3. С. 52-56.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

Подписано в печать 22.12.2022. Тираж 120 экз.
Объем 1,0 уч.-изд. л. Формат 60×84/16. Заказ 471.

ТюмГУ-Press
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.
Тел.: (3452) 59-75-34, 59-74-81
E-mail: izdatelstvo@utmn.ru