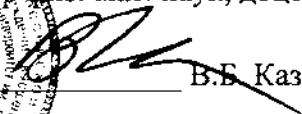


УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе ННГУ
доктор физ.-мат. наук, доцент

В.Б. Казанцев
22 октября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Ерохина Виктора Васильевича
«Органические мемристорные приборы и нейроморфные системы»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Диссертация посвящена комплексному экспериментальному и теоретическому исследованию органических мемристорных (мемристивных) устройств, моделированию и реализации нейроморфных систем на их основе.

Актуальность темы исследования

Текущее развитие науки и техники происходит на фоне серьезных парадигмальных изменений, затрагивающих различные области науки, технологические отрасли и ведущих к созданию на основе конвергентного подхода новых искусственных природоподобных систем, которые могут быть органично встроены в системы природные. Ярким примером новой парадигмы является совокупность научных представлений и технологических подходов, ведущая к созданию уникальных биоподобных (нейроморфных) систем на основе простых органических или неорганических материалов (элементов), конструируемых с помощью нанотехнологий. Одним из таких элементов является мемристор, который, с одной стороны, представляет собой очень простой двухполюсный элемент электрических цепей (сопротивление с эффектом памяти), а с другой стороны, это нелинейная динамическая система, которая за счет внутренних стохастических явлений может воспроизводить функции биологических синапсов и нейронов. Такие свойства позволят не только аппаратно реализовать мозгоподобные вычислительные системы, но и совершить качественный прорыв на пути к интеграции искусственных электронных систем и живых нейрональных культур или участков мозга.

Эффект переключения сопротивления (резистивного переключения) в твердотельных структурах был известен с начала прошлого века, однако до публикации 2008 года в Nature коллектива из HP Labs (Д. Струков и др.) никто не связывал эти структуры с мемристором, теоретически предсказанным в 1971 году известным американским ученым Леоном Чуа. Автор диссертации – Виктор Васильевич Ерохин – один из ученых-первопроходцев, который в рамках отмеченной выше парадигмы прошел путь от идеи использовать эффект резистивного переключения в мемристивных устройствах и системах до создания прототипов сложных нейронных сетей и моделирования ключевых функций человеческого мозга. В частности, первая работа автора по данной тематике была опубликована в 2005 году, когда термин «мемристор» еще не был известен широкому научному сообществу.

За последние 10 лет исследовательское направление, связанное с разработкой и изучением свойств мемристоров, а также их использованием в электронике, нейробиологии и медицине выделилось в отдельную область физики конденсированного состояния. Ведущие научно-исследовательские центры и промышленные компании рассчитывают на существенный прорыв при реализации на основе мемристивных структур универсальных запоминающих устройств нового типа (в частности, RRAM – Random Access Resistive Memory), специальных логических элементов с памятью и перестраиваемых процессоров, работающих по принципу «логика в памяти» (logic-in-memory). Непрерывно по всему миру растет число научных конференций и симпозиумов по мемристорам и мемристивным системам. Следует отметить, что В.В. Ерохин – организатор одного из первых симпозиумов по адаптивной мемристивной электронике в рамках главного ежегодного Европейского форума материаловедов (EMRS Spring Meeting).

Большинство работ по мемристорам, опубликованных к настоящему времени, базируются на использовании неорганических материалов. Это в первую очередь связано с тем, что практически все современные системы обработки информации (компьютеры) создаются с помощью КМОП-технологий. Имеющуюся технологическую базу представляется целесообразным использовать и для реализации мемристивных систем, что существенно упрощает их интеграцию в интегральные схемы.

В то же время, в последние годы широко обсуждается возможность использования для нужд электроники органических материалов. Органические материалы обладают целым рядом важных свойств, таких как низкая цена, легкий вес,

возможность реализации гибких элементов и схем, низкие энергозатраты. Все это позволяет рассматривать их в качестве весьма перспективных кандидатов при разработке нейроморфных систем.

Помимо работ автора диссертационной работы, в мире известны публикации всего лишь нескольких групп, занимающихся исследованиями мемристоров на основе органических материалов. В России такие работы ведутся только под руководством автора диссертации, и уровень публикаций в данном направлении существенно превышает средний.

Таким образом, разработка методов получения мемристивных систем на основе органических материалов, конструирование и всестороннее исследование органических мемристивных устройств, построение нейроморфных систем на их основе, безусловно, являются **актуальными задачами**.

Новизна исследования и полученных результатов

Автором диссертационной работы получены следующие основные результаты, которые обладают существенной новизной на мировом уровне:

1. Впервые изготовлено и исследовано органическое электрохимическое мемристивное устройство на основе структуры полианилин – полиэтиленоксид.
2. Впервые продемонстрирована возможность работы органического электрохимического мемристивного устройства в режиме автоколебаний.
3. Разработаны качественные и количественные модели, описывающие работу органического электрохимического мемристивного устройства.
4. Впервые изготовлены и исследованы мемристивные системы, имитирующие архитектуру и свойства отдельных участков нервной системы простого животного, отвечающих за обучение при кормлении.
5. Впервые изготовлены и исследованы логические элементы с памятью на основе органических электрохимических мемристивных устройств.
6. Впервые реализованы и исследованы стохастические обучаемые системы на основе блок-сополимеров с мемристивными связями.
7. Впервые показана роль алгоритма обучения в электрических свойствах системы со случайным образом организованными мемристивными связями.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов

Обоснованность научных положений, выводов и достоверность результатов подтверждаются использованием надежного сертифицированного оборудования (в том числе на базе разных лабораторий мира), многолетней историей публикаций в данном направлении (в том числе работами других авторов, которые подтверждали опубликованные диссертантом результаты), высоким уровнем цитирования работ (автор имеет индекс Хирша – 30, суммарное количество цитирований – более 2500 по данным Scopus), а также всесторонним их обсуждением на представительных российских и международных форумах, посвященных тематике исследования.

Значимость для науки результатов исследований заключается в том, что реализован уникальный электронный прибор, обладающий важнейшими свойствами биологического синапса и/или нейрона, а построенная математическая модель, описывающая его работу, позволила оптимизировать конструкцию прибора и рассчитывать и реализовывать сложные электронные схемы на его основе.

Практическое значение представленной диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложен и реализован новый тип электронного прибора – органическое электрохимическое мемристивное устройство. Показано, что данный прибор может быть использован в качестве ключевого элемента обучаемых систем.
2. Разработанные модели работы прибора могут быть использованы для оптимизации технологии их изготовления и расчетов сложных схем и сетей на их основе.
3. Разработанные логические элементы с памятью являются ключевыми элементами широко обсуждаемых в настоящее время «процессоров в памяти».
4. Автогенератор на основе органического прибора может быть использован в качестве тактового генератора в нетрадиционных вычислительных системах.
5. Продемонстрированные схемы имитируют архитектуру и свойства участков нервной системы простых живых существ и открыли возможность проведения модельных экспериментов по влиянию различных алгоритмов обучения.
6. Разработанные методики формирования и исследования могут быть использованы не только для мемристивных устройств и систем, но и для других органических структур, таких как транзисторы, сенсоры и актуаторы.

7. Реализованные стохастические системы на данный момент являются уникальными объектами с трехмерной организацией и случайным образом распределенными связями между пороговыми элементами.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты по реализации органического мемристивного устройства, методам его исследования и разработанные модели могут быть использованы (и уже используются) в научно-исследовательских центрах, тематика работы которых связана с разработкой мемристивных наноматериалов и систем. Среди таких центров можно отметить университет Пармы (Италия), Итальянский национальный совет по науке (Италия), университет г. Бристоль (Великобритания). В России результаты могут быть использованы в НИЦ Курчатовский институт, университете Лобачевского (Нижний Новгород) и Казанском (Приволжском) федеральном университете.

Оформление диссертации и автореферата, публикации, апробация научных результатов и положений

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы. Материал изложен на 329 страницах, включающих 126 рисунков и 10 таблиц.

Автореферат и публикации по теме исследования полно отражают основное содержание диссертации и в полной мере соответствуют требованиям паспорта специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Материал диссертации логически выстроен, и в каждой главе сделаны конкретные выводы. Положения, выносимые на защиту, научно обоснованы в тексте диссертационной работы, отражены в 58 работах, 53 из которых опубликованы в журналах, индексируемых базами данных ISI Web of Science и Scopus, а остальные 5 работ – это главы в монографиях, в четырех из которых В.В. Ерохин – единственный автор.

Автор диссертации организовал пять международных симпозиумов по тематике диссертации, а также выступал с пленарными и приглашенными докладами на 18 российских и международных конференциях, тема которых была связана с мемристорами и мемристивными системами.

Общие замечания

Впечатляет целостность работы, которая, конечно, обеспечена стратегическим планированием работ и взаимоувязанностью всех глав и разделов. Видно, что все эксперименты тщательно выверены, а результаты новых экспериментов подтверждают предположения или утверждения, сделанные в ходе предыдущих исследований. Работа представляет собой яркий пример истинного научного поиска с важными успехами и неожиданными проблемами, которые последовательно решаются благодаря смекалке автора и оригинальным научно-техническим решениями как при построении экспериментов, так и при интерпретации их результатов.

В то же время, следует отметить ряд замечаний по представленной работе:

1. В тексте диссертации не обнаружена информация о конкретном оборудовании и методиках для измерения электрофизических характеристик органических мемристоров в режиме постоянного тока и, особенно, в импульсном режиме.

2. Автором утверждается, что мемристор Чуа не может быть реализован по принципиальным соображениям, но в то же время наблюдаемое поведение органических мемристивных устройств каждый раз сводится к классической модели Чуа, которая затем используется при моделировании нейронных сетей.

3. При описании упрощенной модели мемристора в п. 3.2.2 автор почему-то не приводит окончательных выражений (после всех подстановок) для зависимости тока от напряжения и для уравнения состояния, которые определяют модель мемристивного устройства.

4. При моделировании обучения нейронной сети на основе 27 мемристоров с заданной архитектурой в работе используется по сути ручной подбор путей распространения сигнала (комбинаций мемристоров), которые обеспечивают заданный отклик сети. С другой стороны, моделируемая сеть представляет собой многослойный перцептрон, для которого существуют отработанные алгоритмы обучения, основанные на обратном распространении ошибки. Не очень понятно, почему они не использовались для обучения.

5. Периодически в тексте работы встречаются категоричные утверждения автора о том, что важные биологические функции невозможно реализовать на неорганических мемристивных устройствах, которые, однако, можно подвергнуть критике. Многочисленные работы последних лет свидетельствуют о том, что для «металл-оксидных» мемристивных устройств можно управляемо воспроизводить

непрерывный спектр промежуточных состояний проводимости в рамках явлений потенциации и депрессии при воздействии последовательностей одинаковых импульсов – спайков (см., например, [Frascaroli et al. 2018, DOI:10.1038/s41598-018-25376-x]). Более сложные явления, например переход от краткосрочной к долгосрочной памяти и частотно-зависимая пластичность, могут быть реализованы в так называемом «мемристоре второго порядка» с многоуровневой динамикой как в одном устройстве [Kim et al. 2015, DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b00697], так и в комбинации «волатильного» и «неволатильного» неорганических мемристоров [Yang et al. 2018, DOI: 10.1002/adfm.201704455].

6. Сравнение органического и неорганического мемристоров, приведенное в подразделе 5.4 и свидетельствующее, по мнению автора, не в пользу мемристора на основе оксида металла с точки зрения нейроморфных применений, является не очень корректным. Дело в том, что режим наносекундного переключения металл-оксидной структуры, подходящий для «цифровых» приложений, реализуется при высоких напряжениях, тогда как уменьшение напряжения всего лишь в разы приводит к увеличению времени переключения на многие порядки величины в соответствии с так называемой “дилеммой напряжения-времени” (voltage-time dilemma) [S. Menzel et al. 2015, DOI: 10.1002/adfm.201500825]. В частности, время переключения при малых напряжениях (1-2 В) может быть в миллисекундном диапазоне, соответствующем характерным длительностям сигналов в живой нервной системе!

7. Есть ли какие-либо результаты, доказывающие биосовместимость реализованных органических мемристивных устройств?

8. Из рисунка 4.21 не совсем понятно, к чему подсоединяются электроды сравнения второго и третьего мемристора в цепях переноса сигнала.

9. Диссертация в целом написана ясным языком, добротна оформлена, но имеются опечатки, ошибки в формах слов и пунктуации. Приведем лишь некоторые примеры опечаток и ошибок: «В отличии от ...» (стр. 8, 275), «а так же ...» (стр. 11, 119, 144), «... выносимые не защиту» (стр. 14), «скачек» (стр. 29), «не взирая (не смотря) на ...» (стр. 51, 52, 192, 226, 238, 243), «В вкратце ...» (стр. 109), «в течении ... часов» (стр. 109, 147), «мемрислорного прибора» (стр. 123), «в обоих цепях» (стр. 133), «переиенными» (стр. 143), «ыфвнутренней» (стр. 152), «по отношению к ... сети» (стр. 156), «гетеро-синаплическую» (стр. 177), «bootom-up» (стр. 236).

10. Автор периодически использует некорректные термины, которые являются буквальным переводом англоязычных терминов, но не используются в русскоязычной

литературе, например: «роботика» вместо «робототехника» (стр. 28, 276), «электроформирование» вместо «электроформовка» (стр. 34, 228, 229), «пристиновое состояние» вместо «исходное состояние» (стр. 85), «ПС» вместо «ПК» (стр. 172).

11. В тексте работы присутствуют некорректные ссылки на источники (например, ссылка 231 вместо 131 на стр. 157). Некоторые источники повторяются в списке литературы: например, 73 и 133, 150 и 310.

Заключение

Отмеченные недостатки не снижают научной значимости и практической ценности диссертации, которая представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему, открывающую новое направление в области физики конденсированного состояния. Междисциплинарный характер работы позволяет сделать вывод, что представленные результаты будут использованы в областях науки и техники, связанных с электроникой, компьютерной техникой, материаловедением и нейронауками. Проведённые Ерохиным В.В. исследования характеризуют его как ученого высочайшей квалификации, владеющего современными экспериментальными методами, четко представляющего предмет исследования, посвятившего много лет решению поставленной в диссертации цели, а именно, реализации электронных аналогов элементов живой нервной системы и построению нейроморфных систем на их основе.

Диссертация Ерохина Виктора Васильевича «Органические мемристорные приборы и нейроморфные системы» обладает внутренним единством. Она является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решен комплекс важных научных проблем в области физики конденсированного состояния, что позволило создать прототипы информационно-вычислительных систем нового поколения и продвинуться в понимании механизмов функционирования нервной системы живых существ.

Таким образом, диссертация Ерохина Виктора Васильевича полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертация и автореферат рассмотрены, а отзыв заслушан, обсужден и одобрен на совместном заседании научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» (НОЦ ФТНС) ННГУ и отдела твердотельной электроники и оптоэлектроники (отдела № 2) Научно-исследовательского физико-технического института (НИФТИ) ННГУ 18 октября 2018 г. (протокол № 6). На заседании присутствовало 28 сотрудников, из них – 19 докторов и кандидатов физико-математических наук – специалистов по теме диссертационного исследования.

Отзыв составил:

Михайлов Алексей Николаевич,
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией физики и технологии
тонких пленок отдела № 2 НИФТИ ННГУ

почтовый адрес: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, дом 23, корпус 3

номер телефона: 8 (902) 6835126

адрес электронной почты: mian@nifti.unn.ru

и.о. директора НОЦ ФТНС,
зав. отделом №2 НИФТИ, к.ф.-м.н.

О.Н. Горшков

ведущий научный сотрудник НИФТИ,
д.ф.-м.н., проф.

Д.И. Тетельбаум

ученый секретарь НИФТИ, к.ф.-м.н.

В.Г. Володько

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, дом 23

номер телефона: (831) 4623003

адрес электронной почты: unn@unn.ru

сайт: www.unn.ru