

ОТЗЫВ

официального оппонента Каргина Николая Ивановича
на диссертацию 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»

АКТУАЛЬНОСТЬ

Электронные элементы, обладающие некоторыми свойствами биологических синапсов, позволят сделать существенный шаг в построении природоподобных систем обработки информации, в которых хранение и обработка информации будет осуществляться одними и теми же элементами. Такие системы позволят обучение на приборном уровне и смогут стать основой широко обсуждаемых в настоящее время «процессоров в памяти». Кроме того, такие системы позволят осуществить такую функцию, как параллельная обработка информации, что очень важно для решения задач распознавания, классификации и принятия решений.

Мемристорные устройства, электрическое сопротивление которых зависит от истории их работы, исследуются для построения памяти нового типа и в качестве ключевых элементов искусственных нейронных сетей, а также для реализации нейроморфных систем. В последние годы наблюдается огромный рост активности в этой области. Работы по реализации и исследованию мемристорных приборов в последние 10 лет ведутся в исследовательских центрах и промышленных компаниях по всему миру.

В начале двухтысячных годов В.В. Ерохин предложил новый тип мемристорных систем, основанный на свойствах некоторых полимерных соединений.

В работе исследуются новые подходы, связанные с построением органических мемристорных приборов, позволяющие реализацию на

гибких подложках, простоту изготовления и низкое энергопотребление. Изучение электрических и механических свойств и определение механизмов их работы крайне важны для практических приложений. Создание сложных трехмерных систем со случайно организованными связями в них, осуществленное в исследовании диссертанта, а также разработка методов их обучения, позволило реализовать перестраиваемые систем нового типа.

В этой связи, актуальность темы диссертационной работы Ерохина В.В. не вызывает сомнений.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

В диссертации разработан новый тип электронного устройства, определен механизм, отвечающий за его работу, построена математическая модель, описывающая его функционирование.

Впервые реализован органический мемристорный прибор на основе полианилина и полиэтилен оксида, который обладает выпрямляющими свойствами и гистерезисом циклической вольт-амперной характеристики. Принцип работы прибора основан на окислительно-восстановительных реакциях в пленке полианилина в зоне ее контакта с полиэтилен оксидом.

Впервые были найдены условия, позволяющие перевести мемристорный прибор в режим осциллятора автоколебаний, посредством включения в цепь электрода сравнения системы, позволяющего накапливать заряд. Это осуществлялось как с помощью подключения внешнего конденсатора, так и путем изготовления электрода сравнения из графита. В последнем случае накопление заряда происходило из-за проникновения ионов лития в кристаллическую решетку графита. Данная работа представляется важной для систем, имитирующих работу нервной системы живых существ, где прохождение циклических процессов является обязательным условием.

Исследован механизм работы устройства с использованием методов спектроскопии и рентгеновской флуоресценции. Следует подчеркнуть, что

использованный метод рентгеновской флуоресценции с использованием синхротронного излучения позволил впервые показать в реальном времени, что переключение проводимости сопровождается движением ионов между областями проводящего полимера и твердого электролита, и что электрическое сопротивление прибора является функцией прошедшего ионного заряда. На основе данных исследований была построена математическая модель, количественно описывающая измеренные вольт-амперные характеристики и качественно описывающая работу устройства в режиме автоколебаний.

Впервые изготовлена и исследована электронная цепь, имитирующая архитектуру и свойства участка нервной системы улитки, отвечающего за обучение этого животного при кормлении. Расположение мемристорных устройств в данной цепи соответствовало расположению синапсов в описанной модели, полученной с помощью микроэлектродов, имплантированных в брюхоногого.

На основе органических мемристорных приборов впервые изготовлены и исследованы логические элементы с памятью. В таких элементах выходной сигнал, который может принимать непрерывные значения от нуля до единицы, зависит не только от текущей конфигурации значений входных сигналов, но и от истории предыдущей работы данного элемента.

Методами самоорганизации впервые реализованы и исследованы стохастические трехмерные сети со случайными связями элементов. Важной составляющей такой сети является блок-сополимер, обеспечивающий разделение фаз. Электрические свойства данных систем определялись алгоритмом их обучения. При этом было показано, что использованный метод существенно влияет на краткосрочные и долгосрочные параметры системы.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

Научная и практическая значимость работы заключается в следующем:

Разработан, реализован и исследован новый тип электронного устройства – органический мемристорный прибор. Показано, что данный прибор может быть использован в качестве ключевого элемента при построении перестраиваемых и обучаемых систем.

Разработанные модели работы устройства, основанные на детальном исследовании процесса переноса носителей, позволили оптимизировать конструкцию прибора. Это, прежде всего, такие основные функциональные характеристики как стабильность электрических свойств, высокое отношение сопротивления в проводящей и диэлектрической формах, форма гистерезиса. Данные модели позволили также рассчитывать характеристики систем, включающих такие элементы.

В работе показана возможность использования органических мемристорных приборов для создания логических элементов с памятью, которые могут быть использованы при разработке «процессоров в памяти» широко обсуждаемых в настоящее время.

Результаты исследований по работе в режиме генератора автоколебаний, представляют практическую ценность при проектировании нетрадиционных вычислительных устройств, так как могут быть использованы при конструировании генератора тактовой частоты.

Раздел посвященный реализации и исследованию электронного аналога участка нервной системы улитки, открывает возможность использования полученных результатов для создания модельных систем, позволяющих проверять рабочие гипотезы в области нейрофизиологии.

Разработанные методы исследования с помощью спектроскопии и рентгеновской флуоресценции имеют самостоятельное практическое значение. В частности, метод рентгеновской флуоресценции в реальном времени уже был применен для исследования движения ионов при работе электрохимического полевого транзистора.

Реализованные и исследованные стохастические трехмерные системы являются уникальными объектами, в которых свойства определяются алгоритмами их обучения. Такие системы можно рассматривать как многослойные перцептроны, связи в которых могут происходить не только между прилегающими слоями, но и между удаленными. Очевидно, что эффективное использование таких систем потребует разработки новых методов обучения, начало которым предложено в данной работе.

Результаты по реализации, методам исследования и разработанные модели могут быть использованы (и уже используются) в научных центрах, тематика которых связана с мемристорными приборами, такими как НИЦ Курчатовский институт и Казанский (Приволжский) Федеральный Университет.

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация Ерохина В.В. состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы из 349 наименований. Общий объем диссертации составляет 329 страниц, в том числе 126 рисунков и 10 таблиц.

Во **введении** автор определяет объекты исследования и формулирует проблему. В **первой главе** автор рассматривает различные мемристорные устройства, определяет положение данного исследования на фоне мировых достижений, рассматривает актуальность темы и ставит цели и задачи. **Вторая глава** посвящена детальному описанию методов реализации, исследованию механизма работы и свойств полученных приборов. Приводится сравнение характеристик устройств, полученных различными методами. Методами спектроскопии было показано, что механизм переключения сопротивления определяется окислительно-восстановительными реакциями в слое полианилина, что сопровождается движением ионов между слоями проводящего полимера и твердого электролита. В **третьей главе** приводятся результаты исследования

работы органического мемристорного прибора в режиме генератора автоколебаний. Было показано, что возникновение автоколебаний связано с накоплением заряда в цепи электрода сравнения. **Четвертая глава** посвящена реализации и исследованию обучаемых систем с заданной архитектурой. Вначале была изготовлена сеть из 8 приборов и показана возможность наведения связей между определенными парами Вход-Выход посредством проведения соответствующей процедуры обучения. Далее, была впервые реализована цепь, имитирующая архитектуру участка нервной системы улитки, отвечающей за обучение при кормлении, свойства которой хорошо соответствовали обучению животного. Наконец, последняя часть главы описывает зависимость силы наведенных связей от частоты и количества подаваемых входных сигналов. В **пятой главе** описываются логические элементы с памятью. В частности, были изготовлены элементы И, ИЛИ и НЕ. Проводится также аналогия поведения данных элементов с нервной системой живых существ при осуществлении функций классификации и принятии решений. **Шестая глава** посвящена реализации трехмерных систем со случайными связями между элементами. В данной части работы показана уникальность возможностей, которыми обладает органический мир: возможность к самосборке и последующее обучение. Показана возможность наведения краткосрочных и устойчивых связей в зависимости от примененного алгоритма обучения. Используя модель данной системы была показана принципиальная возможность обучения такой системы без учителя. В **заключении** автор формулирует основные результаты и выводы диссертации.

ДОСТОВЕРНОСТЬ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность полученных результатов определяется надежностью использованного экспериментального оборудования, соответствием полученных экспериментальных данных результатам, полученным при

расчете с использованием моделей, а также многочисленными цитированиями работ В.В. Ерохина другими авторами.

Результаты диссертации изложены в 53 работах, опубликованных в журналах, индексируемых базами данных ISI Web of Science и Scopus, а также в 5 главах в монографиях (в 4^{ех} из них – В.В. Ерохин - единственный автор). Кроме того, автор организовал пять симпозиумов на международных конференциях ("Neurofunctional materials" в рамках Science beyond Fiction, FET Conference, Prague, April 21-23, 2009; Symposium "Memristor-Based Neuromorphic Circuits and Unconventional Computing" в рамках 10th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2012), Kos, Greece, 19-25 September 2012; Workshop "Unconventional Approaches to Robotics, Automation and Control Inspired by Nature" в рамках 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, May 6 - 10, 2013; Symposium S "Memristor Materials, mechanisms and devices for unconventional computing" в рамках European Material Research Society Spring Meeting, Lille, May 26-30, 2014; Symposium "Nanotechnologies in medical and biological research" within Post-Genome Methods of Analysis in Biology and Laboratory and Clinical Medicine, Kazan (Russia) 29 october - 1 november 2014) и неоднократно докладывал результаты диссертации на международных конференциях: UC09 (приглашенный доклад); Nano-Net 2009, 17 международная IEEE конференция по электронике, цепям и системам; ICECS 2010, Симпозиум Альфреда Нобеля (Alfred Nobel Symposium), 3М: Машины, молекулы мышление (приглашенный доклад); ECOF12 (приглашенный доклад); Международный симпозиум IEEE по мемристорам: От теории к применениям, Турин, Италия, 5 декабря, 2011; ICNAAM, 10 Международная конференция по численному анализу и прикладной математике; Научный симпозиум Российской Академии Наук «Память в биологических, социальных и технических системах», Курчатовский Институт, Москва, 2-3 апреля, 2013; 2013 IEEE 20 Международная конференция по Электронике, Цепям и Системам (ICECS); ICNAAM 12 (два приглашенных доклада на разных симпозиумах); EMRS 2014; Международная конференция по механике – Седьмые Поляховские чтения, Ст. Петербург, Россия, 2-6

февраля, 2015 (пленарная лекция); MEMRISYS 2015; Международная конференция «Актуальные проблемы механики», Ст. Петербург, Россия, 25 июня -01 июля 2016 (пленарная лекция).

Таким образом, представленные к защите результаты прошли широкую апробацию в научном сообществе, что подтверждает их высокий научный уровень.

ОБЩАЯ ОЦЕНКА ДИССЕРТАЦИИ И ЗАМЕЧАНИЯ

Диссертационная работа Ерохина В. В. написана ясно и последовательно, представленные результаты сформулированы подробно и четко. Все результаты получены автором лично или под его непосредственным руководством. Оформление диссертации соответствует принятым правилам и стандартам. Автореферат выполнен с соблюдением установленных требований по объему и структуре, полно и точно отражает содержание рассматриваемой диссертационной работы.

Между тем, необходимо сделать некоторые замечания.

1. Описывая природоподобные механизмы обучения, автор опирается на классическое обучение по правилу Хебба. В настоящее время, более корректной формулировкой данного правила является STDP.
2. Не очень понятна значимость результатов, приведенных на рисунке 1.19. С какой целью автор выделил данную область исследования, и чем определяется сдвиг напряжения?
3. Ось Y на Рис. 2.12 практически нечитаема.
4. Разработанный автором прибор на основе ПА/ПЭО заявлен как первое мемристивное устройство на основе органических материалов (с. 43, ссылки [164, 165], первая работа – 2005 г. Однако, в момент публикации работы [164] термин «мемристивное устройство» ещё не употреблялся, он начал применяться с 2008 г. Как справедливо заметил автор, до того применялся термин «устройство с переключаемым

сопротивлением» (с. 32). Исследование органических материалов в устройствах с переключаемым сопротивлением для энергонезависимой памяти началось ранее 2005 г., см. напр. D. M. Aguiar, J. A. Freire, and I. A. Hummelgen, Adv. Mater. Weinheim, Ger. 12, 1063 (2000). Это обстоятельство в диссертации не комментируется.

5. Как замечено на стр. 58 внизу, толщина активного слоя ПА является очень важным параметром, и качественно обсуждаются причины существования некоторой оптимальной толщины. На стр. 119 со ссылкой на экспериментальные данные приводится интервал значений оптимальной толщины – 25-100 нм. Вместе с тем, на с. 121 указаны толщины в диапазоне от 2 до 30 нм. По-видимому, оптимальная толщина связана с кинетикой электромиграции ионов Li, которая определяется прыжковым транспортом в, по-видимому, неупорядоченной среде. В диссертации не исследован детально вопрос оптимизации устройства по толщине активного слоя.
6. Выбор ПА в качестве основы мемристорного устройства недостаточно обоснован в диссертации. Возможность высокой проводимости ПА в сравнении с другими органическими материалами (сопряжёнными полимерами, которые обладают таким интересным свойством, как сильная зависимость электронной (дырочной) подвижности от напряжённости поля, при достаточно большой величине этой подвижности) на наш взгляд, не является определяющей, т.к. кинетика переключения в высокопроводящее состояние и обратно определяется наиболее медленным процессом – электромиграцией ионов Li.
7. Хотя предложенная теоретическая модель качественно согласуется с экспериментальными данными, допущение об однородности проводящих свойств активного слоя ПА по толщине представляется недостаточно обоснованным. Вопрос об однородности связан, по-видимому, с кинетикой электромиграции ионов Li в поперечном направлении,

характерное время которой может быть как меньше, так и больше периода рассматриваемых автоколебаний.

Мелкие замечания:

1. Формула 1.1 – там не «заряд», а изменение заряда
2. Ссылки 175 и 192 – это одна и та же статья.
3. Устройство на рис. 2.35 названо структурой типа «сэндвич», при этом геометрия принципиально не изменилась в сравнении с тем, что было показано раньше

Однако, отмеченные выше недостатки не влияют на качество представленных результатов и не снижают общий уровень диссертации.

Результаты проведенных автором диссертации исследований представляют несомненную ценность и высокую научную значимость для понимания физики процессов в гетероструктурах проводящий полимер – твердый электролит; реализации нейроморфных систем с использованием электронных элементов со свойствами синапсов, реализации искусственных нейронных сетей и моделировании отдельных участков нервной системы живых существ.

Считаю, что диссертационная работа Ерохина В. В. «Органические мемристорные приборы и нейроморфные системы» является завершенной научно-квалифицированной работой и отвечает всем требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ N842 от 24.09.2013, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент: И.о. проректора Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Директор Института

нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ.



Н. И. Каргин

«22» октября 2018г.

Почтовый адрес: 115409, г. Москва, Каширское ш., 31.

Телефон: +7 985 411 40 08

Электронный адрес: krgn@yandex.ru



Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИИУ МИФИ
А.А. Абатурова