

На правах рукописи



**Никируй Кристина Эрнестовна**

**ЭФФЕКТ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В  
НАНОКОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С  
ГРАНУЛАМИ CoFe**

1.3.8. – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

**Научный руководитель:** **Емельянов Андрей Вячеславович**  
Кандидат физико-математических наук,  
начальник отдела ресурсных центров Курчатовского  
комплекса НБИКС-природоподобных технологий, НИЦ  
«Курчатовский институт», г. Москва.

**Научный консультант** **Рыльков Владимир Васильевич**  
Доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Курчатовского комплекса  
НБИКС-природоподобных технологий, НИЦ  
«Курчатовский институт», г. Москва.

**Официальные оппоненты:** **Удовиченко Сергей Юрьевич**  
Доктор физико-математических наук,  
руководитель Научно-образовательного центра  
«Нанотехнологии» ТюмГУ, г. Тюмень;

**Маркеев Андрей Михайлович**  
Доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник, Московский физико-  
технический институт (национальный  
исследовательский университет), г. Долгопрудный.

**Ведущая организация:** Институт проблем лазерных и информационных  
технологий РАН – филиал Федерального  
государственного учреждения «Федеральный научно-  
исследовательский центр «Кристаллография и  
фотоника» Российской академии наук», г. Шатура.

Защита состоится 9 июня 2022 г. в 16: 30 на заседании диссертационного совета  
02.1.003.01 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл.  
Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на  
сайте [www.nrcki.ru](http://www.nrcki.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
02.1.003.01, к.ф.-м.н.



В.А. Демин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время одно из наиболее активно развиваемых направлений в мире в области конвергентных наук и информационных технологий связано с разработкой нейроморфных вычислительных сетей (НВС), которые существенно (на порядки) более эффективны при малом энергопотреблении для решения когнитивных задач (распознавания образов и речи, планирования, принятия решений, прогнозирования и т.д.), чем современные вычислительные системы, базирующиеся на архитектуре фон Неймана [1–3]. Попытки создать НВС только на основе комплементарных структур металл-оксид-полупроводник (КМОП) через уменьшение размеров элементов и использование параллелизма в процессах обработки информации с помощью многоядерной архитектуры не дают желаемого результата. В частности, это происходит из-за сложности реализации синаптической пластичности (изменяемой эффективности передачи сигнала между нейронами) и достаточно высоком при этом энергопотреблении (для моделирования одного синапса требуется нескольких десятков КМОП транзисторов [4]). Толчком к развитию биоподобных процессорных устройств послужила работа по обнаружению мемристивных (запоминающих) свойств структур металл/диэлектрик/металл (МДМ) на основе диэлектрических нанослоев  $TiO_{2-x}$  с вакансиями кислорода [5]. В результате движения в таких структурах - мемристорах (сокр. от «memory resistor» - резистор с памятью) кислородных вакансий в сильном электрическом поле оказывается возможным обратимо изменять электрическое сопротивление структуры в окне памяти ( $R_{on}$ ,  $R_{off}$ ), что позволяет всего лишь одним двухэлектродным элементом моделировать действие синапса (соединения) в нейроморфной сети, являющего ключевым элементом в построении НВС [6] ( $R_{on}$ ,  $R_{off}$  – крайние значения сопротивлений в низкоомном (включенном) и высокоомном (выключенном) состояниях МДМ структуры, соответственно).

Существует два наиболее распространенных типа НВС на основе мемристоров, а именно глубокие нейронные и импульсные (спайковые) нейронные сети [7]. Многие схемы глубоких нейронных сетей были представлены с использованием аналоговых мемристивных весов между искусственными программными или аппаратными нейронами. Однако обучение в этих сетях обычно основывается на различных типах алгоритмов обратного распространения ошибок, эффективная реализация которых затруднена из-за необходимости применения глобального (работающего на уровне всей сети) метода для расчета обновлений весов и требования высокой воспроизводимости мемристоров от цикла к циклу и от устройства к устройству [8].

Спайковые сети кодируют информацию в частотах и временах спайков, приходящих на синапсы, что дает более богатое представление свойств объекта. Это особенно очевидно при обработке временных последовательностей событий (сигналов), таких как речь и видео, при генерации управляющих сигналов для мобильных и роботизированных устройств. Кроме того, обучение спайковых сетей основано на локальных правилах обновления синаптических весов, которые контролируются сигналами, закодированными в спайках, только от пре- и постсинаптических нейронов. Это обстоятельство является значительным преимуществом для реализации компактных и энергоэффективных НВС с обучением в реальном времени, поскольку обновление весов не требует каждый раз вычисления градиентов ошибок для нейронов в более глубоких слоях сети. Однако, несмотря на большой потенциал, вычислительные возможности спайковых НВС не были продемонстрированы в такой степени, как возможности глубоких нейронных сетей, в основном из-за недостаточного изучения и реализации эффективных алгоритмов и правил обучения, а также подходящих функциональных структур на роль мемристивных синапсов. Заметим, что для построения спайковых НВС подходят не все мемристоры, а только так называемые синаптические [9], которые обладают высоким уровнем пластичности, т.е. возможностью квазинепрерывного изменения сопротивления в окне памяти ( $R_{on}$ ,  $R_{off}$ ), причем по биподобным правилам типа STDP (сокр. от spike-timing-dependent plasticity - пластичности, зависящей от времени прихода спайков).

На данный момент наибольший интерес проявляется к исследованиям мемристоров на базе оксидных МДМ структур, которые могут обладать многоуровневым характером резистивного переключения (РП) при больших временах хранения резистивных состояний, а также довольно технологичны в изготовлении и могут быть интегрируемы в современную кремниевую микроэлектронную технологию [7,10]. Эффекты РП в такого рода МДМ структурах обусловлены процессами электромиграции вакансий кислорода или катионов металлов [10,11]. В результате в диэлектрическом слое образуются (или разрушаются) нитевидные проводящие филаменты (металлические мостики), характер формирования которых в значительной степени случаен, что является одной из основных причин деградации свойств мемристоров при циклических РП [8,12,13]. Другой недостаток анионных или катионных мемристивных МДМ структур связан с тем, что для их устойчивой работы необходима, как правило, формовка, заключающаяся в подаче на структуру относительно высокого напряжения, при котором образуются филаменты (мостики). Процесс формовки также носит случайный характер, что приводит к сильному разбросу параметров МДМ мемристоров от устройства к устройству [8,12,13].

Как показано в наших работах, в случае структур металл/наноккомпозит/металл (М/НК/М) на основе металл-оксидных НК переход в проводящее состояние должен определяться перколяционными цепочками, заданными пространственным положением и концентрацией наногранул металла в НК, и потому устойчивость к РП должна быть высокой [А3,А6]. Отметим, что ранее, ощутимых результатов удалось достичь в структурах М/Pt-SiO<sub>2</sub>/М и М/W-SiO<sub>2</sub>/n-Si с нижним контактом из сильно легированного n-Si ( $\rho < 0.05$  Ом·см) [14,15], в которых слой SiO<sub>2</sub> содержал, соответственно, наночастицы Pt и W. В [14], в частности, было показано, что в М/Pt-SiO<sub>2</sub>/М структурах максимальное число РП  $N_{\max}$  может превышать  $\sim 10^7$  при времени хранения резистивных состояний (retention time)  $t_r > 6$  месяцев. На примере М/W-SiO<sub>2</sub>/n-Si структур было также показано, что они не требуют формовки. Причем даже при наличии металлических наночастиц W в переключающем слое W-SiO<sub>2</sub>, в структурах достигается достаточно большое отношение сопротивлений  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} > 10^4$  при  $N_{\max} \approx 4 \cdot 10^2$  и  $t_r \approx 10^4$  с [15]. Однако, в [14,15] не был продемонстрирован многоуровневый характер РП, разработанных структур; не были выявлены механизм РП, а также возможная связь РП структур с эффектами их перколяционной проводимости.

Синтезированные М/НК/М-структуры на основе НК Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub>-LiNbO<sub>3</sub> содержали в оксидной матрице LiNbO<sub>3</sub> помимо наногранул CoFe размером 3-6 нм, диспергированные атомы Co и Fe с концентрацией достигающей  $\sim 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Оказалось, что такого рода мемристоры обладают высокой степенью пластичности, в частности, демонстрируют в окне ( $R_{\text{on}}, R_{\text{off}}$ ) более 256 различных резистивных состояний [А7], что позволило имитировать важные свойства биологических синапсов [А7,А8].

В недавнем обзоре [16] рассмотрены основные подходы по увеличению устойчивости мемристивных структур к циклическим РП, стабильности и воспроизводимости РП от цикла к циклу и от устройства к устройству методами инженерии дефектности и дизайна структур. В числе прочих отмечается и подход, основанный на легировании активной области мемристивных структур или введении в нее наночастиц металлов. Однако, мемристоры типа М/НК/М, в которых эффекты РП контролируются как наногранулами металла, так и неравновесными диспергированными атомами металла, способными нуклеировать при протекании тока и создавать устойчивые каналы РП, в обзоре [16] не рассматриваются.

В итоге можно заключить, что на момент начала исследований по теме диссертации работы по повышению устойчивости РП путем введения наночастиц металла в активный слой МДМ структур носили зачаточный эмпирический характер. В частности, в этих работах не анализировалась ключевая роль в РП эффектов

перколяционной проводимости. Важно также отметить, что до сих пор отсутствуют исследования, в которых с использованием методов инженерии дефектности и/или дизайна структур одновременно решаются проблемы как повышения устойчивости РП структур типа МДМ, так и достижения высокой степени их пластичности, необходимой для использования мемристоров при реализации спайковых НВС.

Таким образом, исследования эффекта РП в структурах М/НК/М на основе гранулированных НК типа  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20}\text{-LiNbO}_3$  с высоким содержанием диспергированных атомов металла в оксидной матрице, а также возможности использования данных структур для моделирования синапсов при создании спайковых НВС, обладают несомненной научной новизной; являются весьма актуальными с фундаментальной и практической точек зрения.

### **Цель и задачи работы:**

Целью данной работы является: 1) установление основных особенностей и механизма резистивного переключения в структурах металл-нанокompозит-металл (М/НК/М) на основе НК типа  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20}\text{-LiNbO}_3$  с наногранулами  $\text{CoFe}$  и высоким содержанием ( $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ) диспергированных атомов  $\text{Co}$  и  $\text{Fe}$ ; 2) выявление пластичности структур М/НК/М и демонстрация возможности их применения для имитации синапсов при создании нейроморфных вычислительных систем.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Методом ионно-лучевого распыления синтезированы мемристивные структуры М/НК/М на основе НК  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20}\text{-LiNbO}_3$  с наногранулами  $\text{CoFe}$  и высоким содержанием диспергированных атомов  $\text{Co}$  и  $\text{Fe}$  ( $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ).

2. Изучены мемристивные свойства М/НК/М структур на основе НК типа  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20}\text{-LiNbO}_3$ : их вольт-амперные характеристики (ВАХ) при различном содержании металла  $x$ , максимальное количество переключений, время сохранения состояний, возможность задания произвольного резистивного состояния в окне ( $R_{\text{on}}$ ,  $R_{\text{off}}$ ).

3. Исследованы структурные, магнитные, электрофизические свойства мемристивных М/НК/М структур на основе НК типа  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20}\text{-LiNbO}_3$ , по результатам которых развита модель многофиламентного механизма резистивного переключения, основанная на представлениях о нуклеации диспергированных атомов вокруг перколяционных цепочек наногранул и образовании металлизированных нитевидных наноканалов (филаментов) к интерфейсному слою  $\text{LiNbO}_3$ , определяющему РП структур.

4. Изучена возможность изменения проводимости НК мемристоров по биоподобным правилам STDP (пластичности, зависящей от времени прихода спайков). Предложен метод дофаминоподобной модуляции пластичности НК мемристоров, основанный на введении коэффициентов (множители от -1 до 1) для амплитуд спайков.

5. Разработана простая НВС с использованием М/НК/М мемристоров в качестве синапсов для исследования способности обучения сети при частотном и временном кодировании, а также способности к самоадаптивному обучению.

### **Научная новизна работы**

1. Показано, что мемристивные М/НК/М структуры на основе НК типа  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  ( $x \sim 8-15$  ат.%) обладают устойчивыми от цикла к циклу, стабильными и многоуровневыми резистивными переключениями, что делает их перспективными для применения в нейроморфных вычислительных системах.

2. Предложен и реализован алгоритм резистивного переключения мемристоров в состояние с заданным сопротивлением, основанный на последовательных шагах считывания и записи состояния импульсами с возрастающей амплитудой.

3. Предложена модель многофиламентного механизма многоуровневого резистивного переключения мемристивных М/НК/М структур на основе НК типа  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ .

4. Показано, что за счет нуклеации магнитных атомов Fe и Co возникает дополнительная ферромагнитная фаза, что подтверждает предложенную модель РП.

5. Продемонстрирована возможность изменения проводимости мемристивных М/НК/М структур на основе НК типа  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}\text{-LiNbO}_3$  согласно биоподобной пластичности, зависящей от времени прихода спайков (STDP), что позволяет использовать такие мемристоры в качестве синаптических связей при создании спайковых НВС.

6. Предложен метод дофаминоподобной модуляции окна мемристивной STDP, который позволяет имитировать пластичность биологических синапсов в присутствии дофамина и других нейромодуляторов. Метод основан на выборе коэффициентов для пре- и постсинаптических нейронов, контролирующих амплитуды спайков.

7. На основе программных нейронов и мемристивных М/НК/М структур на базе НК  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  ( $x \sim 8-15$  ат.%), выступающих в качестве синапсов, разработана простая спайковая НВС и показана ее способность к самоадаптации, обучению с помощью частотного и временного кодирования. Показано, в частности, что конечное состояние мемристоров зависит от последовательности спайков, однако, не зависит от конкретного мемристора или его начального состояния. При соотношении частот 5:1 и 10:1 возможно разделение весов для различных комбинаций на входе сети. При временном кодировании возможно разделение весов при различном сдвиге момента подачи спайка от начала цикла обучения.

**Практическая значимость** работы обусловлена тем, что ее результаты могут быть использованы при разработке мемристивных элементов и нейроморфных вычислительных систем на их основе. Создано универсальное программное обеспечение для автоматизации измерения характеристик различных мемристивных структур. Описанный в работе механизм резистивного переключения открывает перспективы разработки мемристивных М/НК/М структур с контролируемыми характеристиками. Биоподобная мемристивная STDP демонстрирует возможность применения М/НК/М мемристоров в качестве синаптических связей в спайковых НВС. Предложенный в работе метод дофаминоподобной модуляции позволяет создавать спайковые НВС с обучением и подкреплением на основе изменения пластичности типа STDP с помощью имитации нейромодуляции.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Мемристивные структуры металл-наноккомпозит-металл (М/НК/М) на основе наноккомпозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  с высоким содержанием диспергированных атомов Co и Fe ( $\sim 10^{21}-10^{22}$  см<sup>-3</sup>) способны изменять и сохранять резистивное состояние в диапазоне сопротивлений  $\sim 10^2 - 10^4$  Ом при площади структур  $10^{-3}$  см<sup>2</sup> и оптимальном  $x \sim 8-15$  ат.%. Мемристоры М/НК/М обладают большим количеством циклов резистивных переключений без деградации (более  $10^6$ ) и длительным временем сохранения выбранных резистивных состояний (не менее  $10^4$  с).

2. Алгоритм резистивного переключения мемристоров, основанный на последовательных шагах считывания и записи состояния импульсами с возрастающей амплитудой, позволяет устанавливать резистивное состояние мемристивных М/НК/М

структур с погрешностью не хуже 0.5 %. Случайное изменение длительности импульсов в пределах 10% обеспечивает сходимость процедуры установки резистивного состояния мемристора. Для мемристивных М/НК/М структур с помощью данного алгоритма удается установить более 256 состояний.

3. Свообразие мемристивных свойств структур М/НК/М объясняется многофиламентным характером резистивного переключения, связанным с наличием большого числа диспергированных атомов Fe и Co в матрице  $\text{LiNbO}_3$  (до  $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ) и самоорганизованным формированием около нижнего электрода структуры высокоомной прослойки аморфного  $\text{LiNbO}_3$  (около 10 нм). Нуклеация атомов на перколяционных цепочках наногранул при первых переключениях, подтвержденная изменением намагниченности структур, приводит к образованию многочисленных нитевидных филаментов (до  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ ), контролирующих переключения интерфейсной прослойки  $\text{LiNbO}_3$ , и тем самым, обеспечивающих их устойчивость и многоуровневый характер.

4. В структурах М/НК/ $\text{LiNbO}_3$ /М с наноразмерными слоями НК  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  ( $\approx 10$  нм) и  $\text{LiNbO}_3$  ( $\approx 40$  нм) с увеличением содержания металлической фазы до  $x \approx 13-14$  ат.% наблюдается резкое увеличение предельного тока пробоя структур (более чем на три порядка), которое объясняется переходом к многофиламентному характеру резистивного переключения.

5. НК мемристоры способны моделировать синапсы в импульсных НВС. Их проводимость (вес синапса) может изменяться аналогично пластичности биологических синапсов типа STDP, т.е. пластичности, зависящей от времени задержки между пре- и постсинаптическими спайками, в том числе при дофаминоподобной ее модуляции. Вид окна STDP зависит от формы спайков, генерируемых пре- и постсинаптическим нейронами, и коэффициентов, контролирующих их амплитуды.

6. Импульсная НВС с синаптическими связями на основе мемристивных М/НК/М структур способна к самоадаптации, обучению с помощью частотного и временного кодирования. Конечное состояние мемристоров при самоадаптации зависит от последовательности спайков, однако, не зависит ни от конкретного мемристора сети, ни от его начального состояния. Расхождение весов для различных комбинаций образов на входе сети возможно при соотношении частот входных спайков, превышающем 5:1, и при различном сдвиге момента подачи спайка от начала цикла обучения.

### **Личный вклад автора.**

В основу диссертационной работы вошли исследования соискателя, выполненные в 2016 – 2021 годах. Личный вклад автора был основным в выполнении экспериментов по изучению электрофизических характеристик нанокompозитных мемристивных структур и возможности их использования в качестве синапсов при построении НВС, в обработке и анализе полученных данных, а также в подготовке публикаций, отражающих результаты диссертационной работы.

**Достоверность результатов** гарантирована применением современных, хорошо апробированных методов исследований на аттестованных установках; согласованием экспериментальных данных с теоретическими представлениями, вытекающими из оригинальных и общепринятых физических моделей.

### **Апробация работы.**

Результаты работы были представлены на 12 российских и международных научных конференциях, симпозиумах и молодежных школах:

1. К.Э. Никируй. Изучение электрофизических свойств мемристоров на основе нанокompозита  $\text{CoFeV/LiNbO}_3$  // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Ломоносов-2017.

2. К.Э. Никируй, А.В. Емельянов, В.А. Демин, А.Н. Михайлов, Пластичность мемристивных структур на основе нанокompозита  $(\text{CoFeV})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  // Юбилейная XV Курчатовская Междисциплинарная Молодежная Научная Школа 2017.

3. К.Э. Никируй, А.В. Емельянов, В.А. Демин, В.В. Рыльков, Изучение мемристивных свойств нанокompозита  $(\text{CoFeV})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  // 60-ая научная конференция МФТИ, 2017.

4. К.Э. Никируй. Применение мемристоров на основе нанокompозита  $(\text{CoFeV})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  в простейших нейроморфных системах // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Ломоносов-2018.

5. К.Э. Никируй, А.В. Емельянов, В.А. Демин, В.В. Рыльков, Изучение нейроморфных систем на основе нанокompозитных мемристоров // 61-ая научная конференция МФТИ – 2018г.

6. К.Э. Никируй, Адаптивные свойства нейроморфных систем на основе наногранулированных мемристоров// Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019».

7. К.Е. Nikiruy, A.V. Emelyanov , V.V. Rylkov, V. A. Demin ,Emulation of dopamine-assisted STDP learning in nanocomposite memristive devices//Memrisys-2019.

8. К.Е. Nikiruy, A.V. Emelyanov, I.A.Surazhevskiy, V.V. Rylkov, A.V.Sitnikov, V.A. Demin, Dopamine-assisted STDP modulation of nanocomposite memristive synaptic weight. // EMRS Fall meeting 2019.

9. К.Э. Никируй, А.В. Емельянов, А.В. Ситников, В.В.Рыльков, В.А. Демин, Дофаминаподобная модуляция пластичостинанокомпозитных мемристоров// 62-я научная конференции МФТИ, 2019г.

10. К.Э. Никируй, А.В. Емельянов, И.А. Суражевский, В.В.Рыльков, А.В. Ситников, В.А. Демин, Многоуровневый мемристивный элемент на базе наногранулированного композита для нейроморфных приложений// Форум "Новые материалы и перспективные технологии", 2019 г.

11. К.Э. Никируй, А.В. Емельянов, И.А. Суражевский, А.В. Ситников, В.В. Рыльков, В.А. Демин, Массивы нанокompозитных мемристоров для нейроморфных приложений// XXIV симпозиум «Нанofизика и нанoeлектроника», 2020г.

12. К.Э. Никируй, А.В. Емельянов, В.В. Рыльков, В.А. Демин, Хеббовское обучение мемристивных импульсных нейронных сетей// XXIV научная конференция по радиофизике 2020 г.

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования изложены в 10 статьях, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК, и реферируемых базах данных Web of Science и Scopus, а также в 12 тезисах российских и международных конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 136 страниц с 50 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 205 наименований.

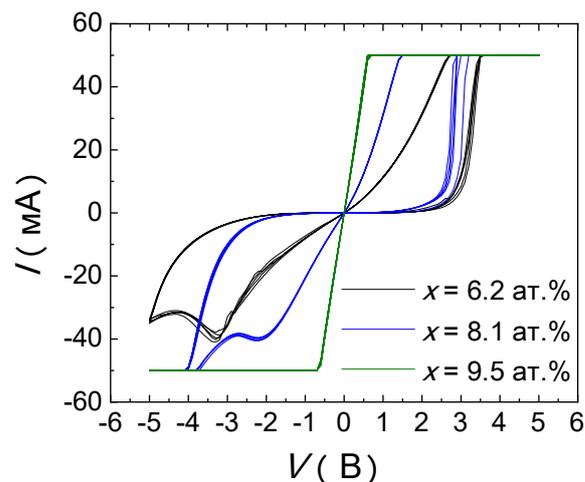
## Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, указаны ее цели, задачи и сформулированы основные положения, выносимые на защиту; аргументированы научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

В **Главе 1** представлен обзор литературы по основным типам мемристоров в зависимости от механизма их РП: термически активированные переходы между аморфным и кристаллическим состояниями материала (мемристоры на основе изменения фазового состава); туннельное спин-зависимое магнетосопротивление (спиновые мемристоры); туннельное сопротивление, зависящее от направления электрической поляризации (сегнетоэлектрические мемристоры) и электрохимические реакции (мемристоры на основе окислительно-восстановительных реакций и электромиграции ионов). В §1.3 проведена их сравнительная характеристика и показаны преимущества мемристоров на основе оксидов. Также представлены характеристики мемристоров на основе ниобата лития и существующие проблемы при их функционировании. §1.4 показывает возможные пути их решения, а именно, подходы к увеличению устойчивости мемристивных структур к циклическим РП, стабильности и воспроизводимости РП от цикла к циклу. Далее рассмотрено практическое применение мемристоров в качестве синаптических весов в нейроморфных вычислительных системах. Представленный анализ показал, что, несмотря на то, что анионные (катионные) мемристоры и особенно композитные, содержащие наночастицы металла в активной области структур, являются перспективными кандидатами на роль искусственных синапсов в НВС, в отношении них имеется ряд существенных практически важных физических задач. В частности, к ним относятся изучение: механизмов РП, пластичности НК мемристоров, возможности изменения их резистивных состояний по биоподобным правилам типа STDP и дофаминоподобной модуляции пластичности, а также возможности построения НВС с использованием М/НК/М мемристоров.

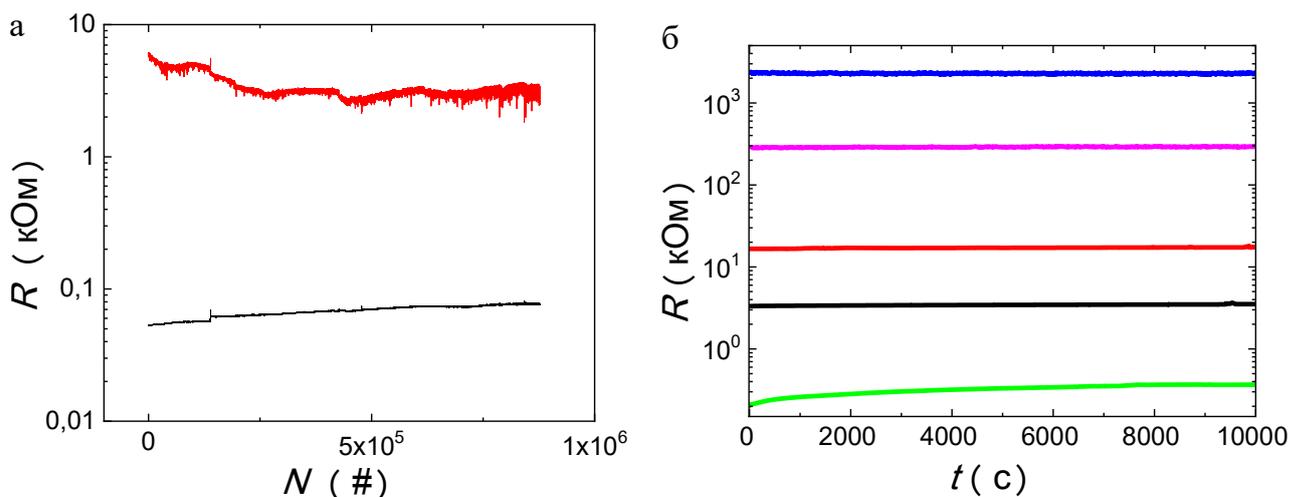
В **Главе 2** описаны исследуемые мемристивные М/НК/М структуры на основе НК  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ . В §2.1 рассмотрена установка ионно-лучевого распыления, с помощью которой были изготовлены исследуемые образцы, а также представлены технологические характеристики и условия их получения. В §2.3 отражены методики исследований мемристивных характеристик. В частности, описаны оборудование для

исследований электрофизических, магнитных и емкостных свойств, тестирование образцов методом вольт-амперных характеристик и способы измерения устойчивости к циклическим резистивным переключениям, времени хранения резистивного состояния, изменения резистивного состояния - веса по правилу STDP. Отдельно описан алгоритм переключения мемристора в заданное резистивное состояние, позволяющий перевести мемристор в требуемое состояние с точностью не хуже 0.5% [A1]. Раздел 2.4 посвящен созданному программному обеспечению для характеристики мемристивных образцов.



**Рис. 1** Типичные ВАХ для мемристивных структур М/НК/М № 1657 с различным содержанием металла:  $x = 6.2$  ат.% (черная кривая), 8.1 ат.% (синяя кривая), 9.5 ат.% (зеленая кривая).

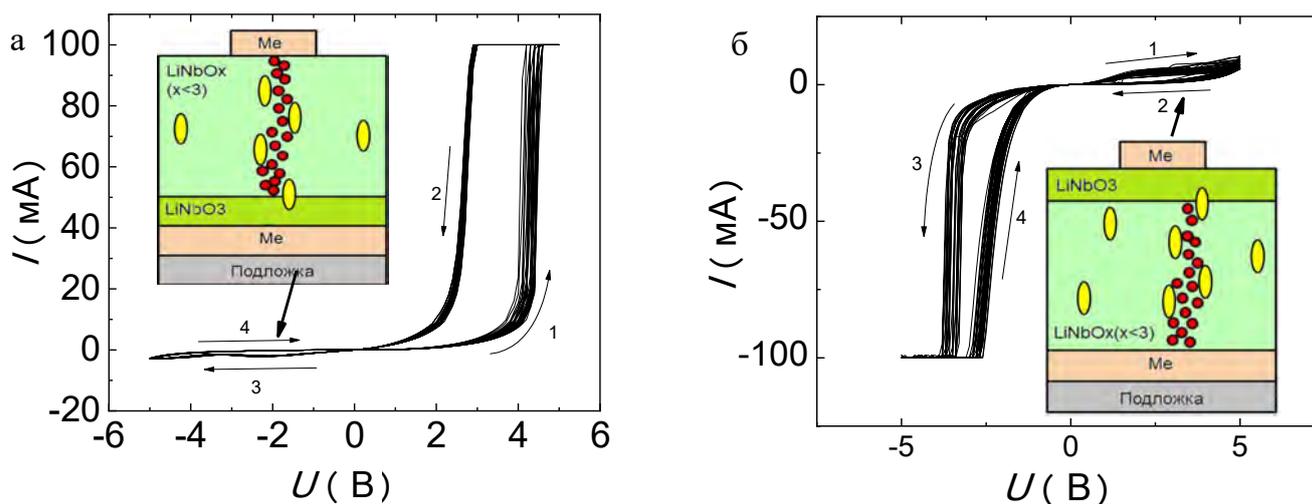
**Глава 3** посвящена механизму резистивного переключения (РП) мемристивных М/НК/М структур [A3, A5, A6]. Показано, что структуры металл-нанокомпозит-металл (М/НК/М) на основе НК  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ - $\text{LiNbO}_3$  демонстрируют наиболее сильные и стабильные резистивные переключения (РП) при некотором оптимальном содержании



**Рис.2** а) Измерение количества циклов РП: зависимость сопротивления от номера цикла переключения. б) Зависимость сопротивления мемристивной структуры М/НК/М от времени для 5 различных состояний

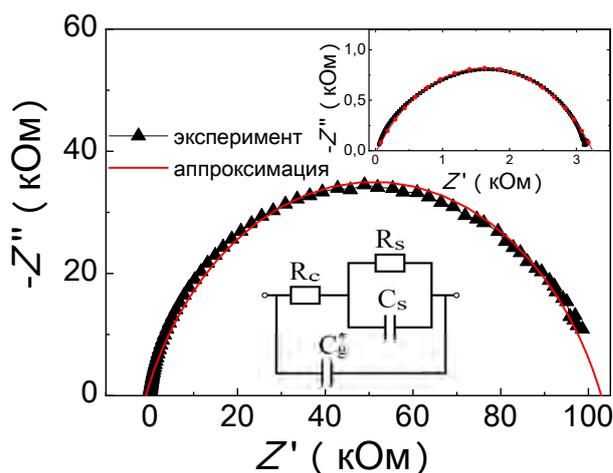
металла ниже порога перколяции (рис. 1). Также обнаружено, что мемристивные структуры М/НК/М имеют квазинепрерывный (аналоговый) характер РП (более 256 резистивных состояний (8 бит/элемент) в диапазоне сопротивлений 0.1–15 кОм) [А7]. Структуры М/НК/М демонстрируют большое количество циклов переключения – более  $10^6$  (рис. 2а) при отношении  $R_{off}/R_{on} > 10$  и длительное время хранения состояний, в том числе промежуточных (рис. 2б). Продемонстрированные мемристивные характеристики структур М/НК/М являются достаточно высокими, что позволяет рассматривать данные системы в качестве перспективных аналогов синапсов при построении НВС.

Для изучения механизма РП структур М/НК/М и построения качественной модели переключения были дополнительно изготовлены структуры, которые отличались способом подачи кислорода в рабочую камеру при осаждении НК. Для одной структуры повышенное давление кислорода создавалось в начале процесса осаждения НК, при этом самоорганизованная аморфная прослойка  $\text{LiNbO}_3$  формировалась у нижнего электрода структуры. Для второй структуры наоборот высокоомная прослойка  $\text{LiNbO}_3$  формировалась у верхнего электрода структуры. На рис. 3 для данных образцов показаны типичные ВАХ, по которым можно заключить, что полярности переключения в первом и во втором образце различны и зависят от расположения аморфного слоя  $\text{LiNbO}_3$ .



**Рис. 3.** Переключение структур ( $x \approx 10$  ат.%) с самоорганизованной прослойкой  $\text{LiNbO}_3$  у нижнего (а) и верхнего (б) электродов, соответственно. На вставках схематически показан механизм РП структур.

В §3.2 описано поведение емкости структур при резистивных переключениях. На Рис. 4 показан типичный годограф импеданса мемристивной структуры с  $x \approx 15$  ат. % в высокоомном состоянии (HRS), на вставке – в низкоомном состоянии (LRS). Для описания этих зависимостей можно использовать эквивалентную электрическую схему (см. нижнюю вставку на Рис. 4), состоящую из параллельной цепи  $R_s C_s$  и последовательно подключенного к ней сопротивления  $R_c$ , которые шунтируются параллельно включенной геометрической емкостью  $C_g^*$  структуры М/НК/М, модифицированной из-за наличия металлических наночастиц в диэлектрике. Сопротивление  $R_s$  и емкость  $C_s$  связаны с наличием высокоомного слоя  $\text{LiNbO}_3$  вблизи нижнего электрода структуры, который определяет ее РП из одного резистивного состояния в другое. Сопротивление  $R_c$ , в свою очередь, определяется сопротивлением металлизированных гранулированных цепочек, обеспечивающих контакт  $R_s C_s$  цепи с верхним электродом структур.



**Рис. 4** Зависимости мнимой части импеданса от действительной для структуры 1661 с  $x \approx 15$  ат. % в высокоомном и низкоомном (верхняя вставка) состояниях. На нижней вставке показана эквивалентная схема структуры.

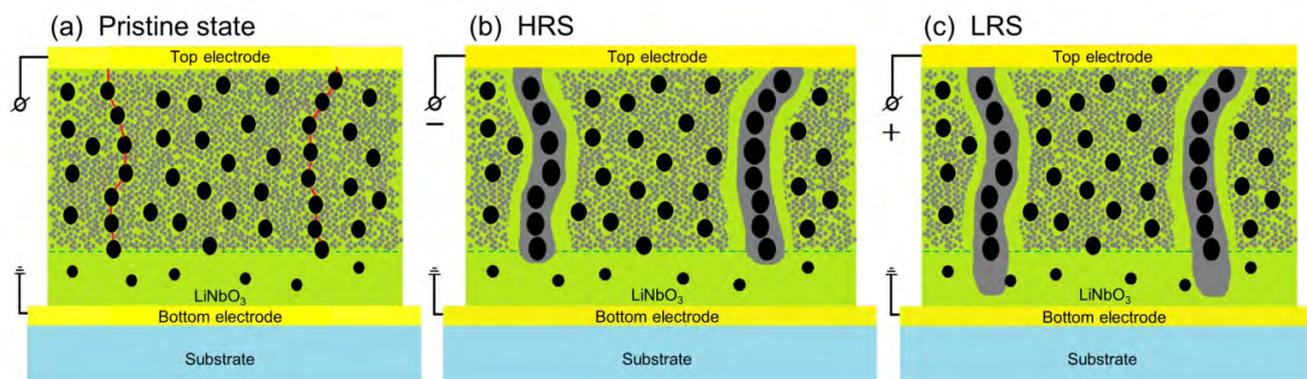
В §3.3 показано влияние резистивных переключений на намагниченность структур. Максимальная концентрация  $n_i$  диспергированных атомов металла (магнитных ионов) наблюдается в исходном состоянии структуры, до ее РП, и составляет  $n_i \approx 6.5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Когда атомы  $\text{Co}$  и  $\text{Fe}$  собираются в металлические гранулы, их магнитный момент должен падать, поэтому при переходе структуры из исходного состояния в состояние со стабильным РП после мягкой электроформовки ожидается максимальное изменение магнитного момента. Относительное уменьшение намагниченности при этом составляет  $\Delta M/M_{PS} \sim 10^{-2}$ . В §3.3 описаны температурные зависимости проводимости мемристивных структур в различных резистивных состояниях. Переключение в LRS осуществлялось при температуре 250 К, чтобы избежать возможного влияния релаксации проводимости на зависимость  $R(T)$ . Показано, что проводимость подчиняется закону “1/2”, ( $\ln R \propto (T_0/T)^{1/2}$ ), часто наблюдаемому в системах с прыжковой проводимостью.

Представленные результаты по влиянию РП на емкость, намагниченность и температурные зависимости сопротивления указывают на многофиламентный характер переключения структур М/НК/М между резистивными состояниями (разделы 3.2-3.4). В данной связи рассмотрен возможный многофиламентный механизм РП мемристивных НК структур, учитывающий описанные выше их особенности: (i) высокое содержание диспергированных атомов Со и Fe в изолирующей матрице  $\text{LiNbO}_3$  (до  $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ) и (ii) наличие в структурах высокоомного слоя из аморфного  $\text{LiNbO}_3$  с  $\epsilon_d$ , достигающей  $\sim (10^2-10^3)$ , который формируется вблизи нижнего или верхнего электрода в процессе роста НК на начальном или заключительном этапе при большом избытке кислорода.

Рис. 5 иллюстрирует качественную модель РП с учетом описанных выше структурных особенностей. В начальном состоянии диспергированные атомы металла равномерно распределены в изолирующей матрице (рис. 5 а). После подачи напряжения и протекания тока может произойти нуклеация («конденсация») диспергированных атомов вокруг перколяционных цепочек из гранул, образующих пути протекания, и, как следствие, образование металлизированных гранулированных цепочек (МГЦ). Проявление эффектов нуклеации обусловлено сильным перенасыщением рассматриваемой системы диспергированными атомами в силу их нерастворимости и наличием в ней металлических центров нуклеации (наногранул). Когда к верхнему электроду приложено достаточно большое отрицательное напряжение, структура переключается в высокоомное состояние из-за перемещения кислородных вакансий и катионов к верхнему электроду посредством МГЦ и увеличения эффективного зазора между ними и нижним электродом (рис. 5 б). Обратная ситуация возникает, когда на структуру подается достаточно большое положительное напряжение (рис. 5 в). В этом случае происходит переход структуры в LRS за счет миграции вакансий и катионов из МГЦ в сторону нижнего электрода, что приводит к уменьшению эффективного диэлектрического зазора  $l_g$  между нижним электродом и МГЦ, но не к полному его исчезновению (закоротке с нижним электродом).

В §3.6 показано резистивное переключение структур на основе нанометровых слоев  $\text{LiNbO}_3$  и композита  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}\text{-LiNbO}_3$ , с суммарной толщиной активной области 50-60 нм [А4]. При этом измерение ВАХ при сканировании по току (без ограничения его величины) приводит к необратимому переходу (электрическому пробую) структур в проводящее состояние с сопротивлением около 10 Ом. Примечательно, что наблюдается существенное отличие характера данного пробоя для мемристивных структур с

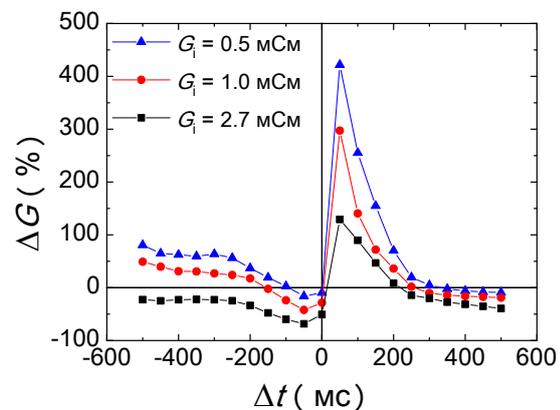
различным содержанием металлической фазы. Так, при малых концентрациях металлической фазы в НК (менее 13.5 ат.%) наблюдается резкий пробы при токах около 20 – 30 мкА. При больших содержаниях металлической фазы наблюдается необратимое уменьшение сопротивления при достижении существенно больших токов (около 100 мА).



**Рис. 5.** Качественная модель РП. (а) Структура М/НК/М в исходном состоянии. Зеленым цветом показана матрица  $\text{LiNbO}_{3-y}$ , содержащая металлические наногранулы  $\text{CoFe}$ . (черные круги) и неравновесная фаза атомов  $\text{Co}$  и  $\text{Fe}$  с концентрацией до  $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$  (серые круги). (б) Структура М/НК/М в высокоомном состоянии (HRS) после мягкой электроформовки и приложения отрицательного напряжения к верхнему электрод. Серые области представляют собой МГЦ, которые возникают из-за процессов нуклеации атомов  $\text{Co}$ ,  $\text{Fe}$  и кислородных вакансий при протекании тока через структуру. (в) Структура М/НК/М находится в низкоомном состоянии (LRS) после приложения положительного потенциала к верхнему электроду.

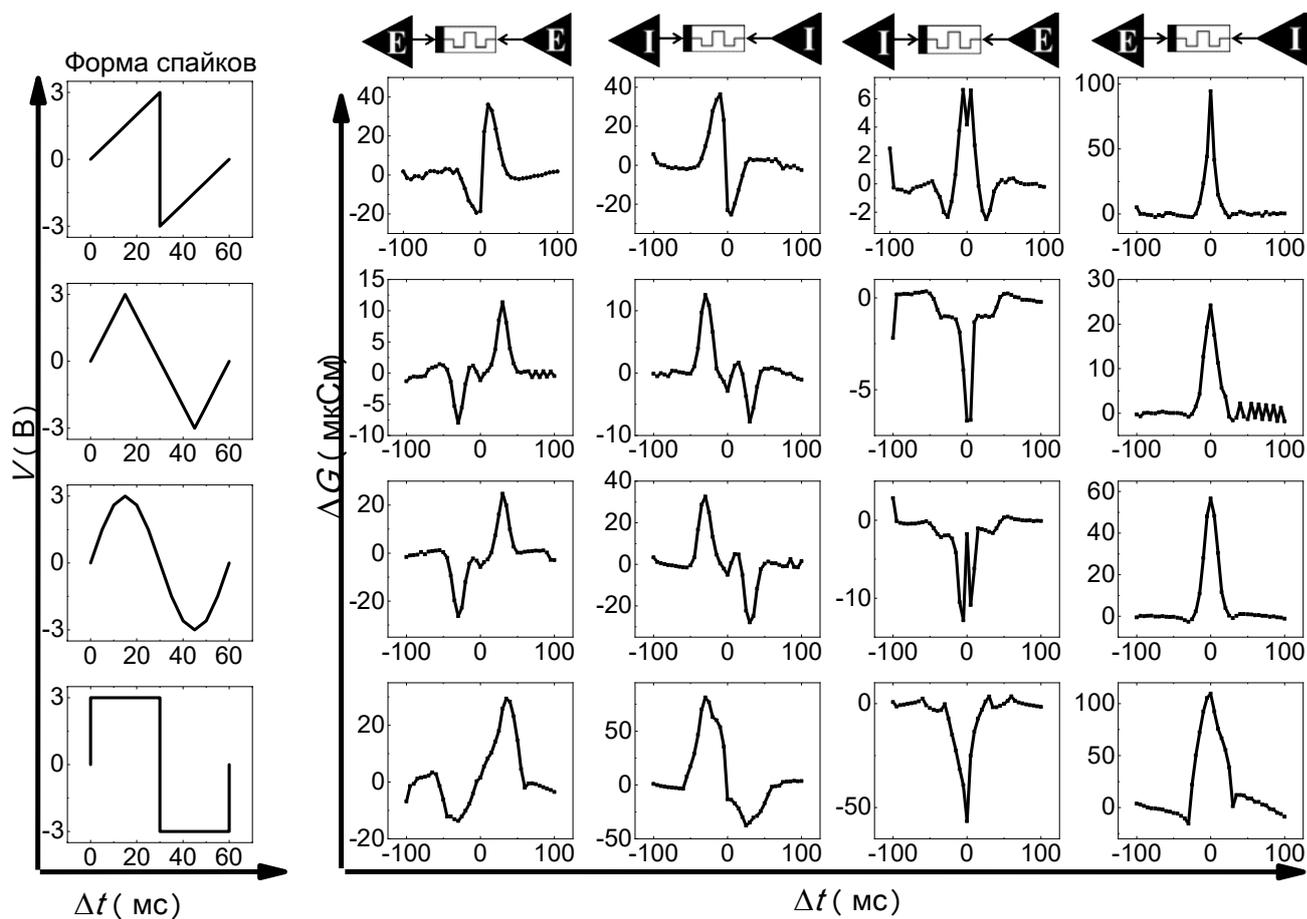
В §3.7 описано влияние эффекта перколяции в нанокompозите на резистивные переключения. Дополнительно для доказательства влияния перколяции в НК на эффект резистивного переключения были изготовлены структуры двух типов: М/НК/ $\text{LiNbO}_3$ /М и М/НК/М без самоорганизованной прослойки  $\text{LiNbO}_3$ . Показано, что РП в структурах со встроенным слоем ниобата лития возникает вблизи порога перколяции для структур типа М/НК/М (для данных структур  $x_p \sim 10$  ат.%), т.е. в условиях, когда их ВАХ становится линейной. При исследовании структур М/ $\text{LiNbO}_3$ /М, также как и при исследовании структур М/НК/М (без самоорганизованной прослойки), не было обнаружено устойчивых обратимых РП. Структуры М/ $\text{LiNbO}_3$ /М демонстрируют нелинейную ВАХ, при этом, удельное сопротивление в слабых полях  $\approx 10^9$  Ом см, что, вероятно, соответствует прыжковой проводимости аморфного  $\text{LiNbO}_3$  в примесной зоне вблизи уровня Ферми (максимальное удельное сопротивление М/НК/М структур составляет  $\sim 10^4$  Ом см).

В Главе 4 описаны нейроморфные системы на основе мемристивных структур М/НК/М. Представлена мемристивная STDP - пластичность, зависящая от времени прихода спайков, которая является одним из перспективных механизмов изменения проводимости мемристора при нейроморфных приложениях. При изучении возможности реализации мемристивного STDP нижний электрод структуры использовался в качестве пресинаптического входа, а верхний электрод – в качестве постсинаптического, т.е. контактов, на которые подавались, соответственно, пре- и постсинаптические спайки в форме одинаковых импульсов напряжения. Проводимость мемристора  $G$  в такого рода экспериментах рассматривается в качестве синаптического веса, а ее изменение  $\Delta G$  эквивалентно изменению синаптического веса. Найденная зависимость относительного изменения веса ( $\Delta G = (G_f - G_i)/G_i$ ) от времени задержки (так называемое окно STDP), усредненная по 10 измерениям для трех различных начальных состояний  $G_i$ , показана на Рис 6.



**Рис. 6** Окно STDP: зависимость относительного изменения проводимости от интервала между спайками.

В присутствии нейромедиаторов, например, дофамина, асимметричная форма окна STDP может быть изменена на колоколообразную. Модулированная пластичность широко наблюдалась в различных типах биологических синапсов и, как полагают, является основным фактором, стимулирующим важные биологические функции, такие как ассоциативное обучение, сенсорное восприятие и долговременная память. Помимо обычного правила STDP управления мемристивным весом, в §4.2 был предложен подход для имитации нейромодулированной пластичности, а именно для изменения формы окна STDP [A8]. Для этого были введены два коэффициента для пре- и постсинаптических нейронов, контролирующих амплитуды спайков:  $K_{pre}$  и  $K_{post}$ . Полярности спайков соответствовали разным режимам работы нейронов. Нейрон в режиме возбуждения (E) генерировал спайки с положительной первой половиной и отрицательной второй половиной импульса напряжения ( $K = +1$ , первый столбец на рис. 7). Наоборот, в тормозном режиме (I) сгенерированные спайки были обратной полярности ( $K = -1$ ).

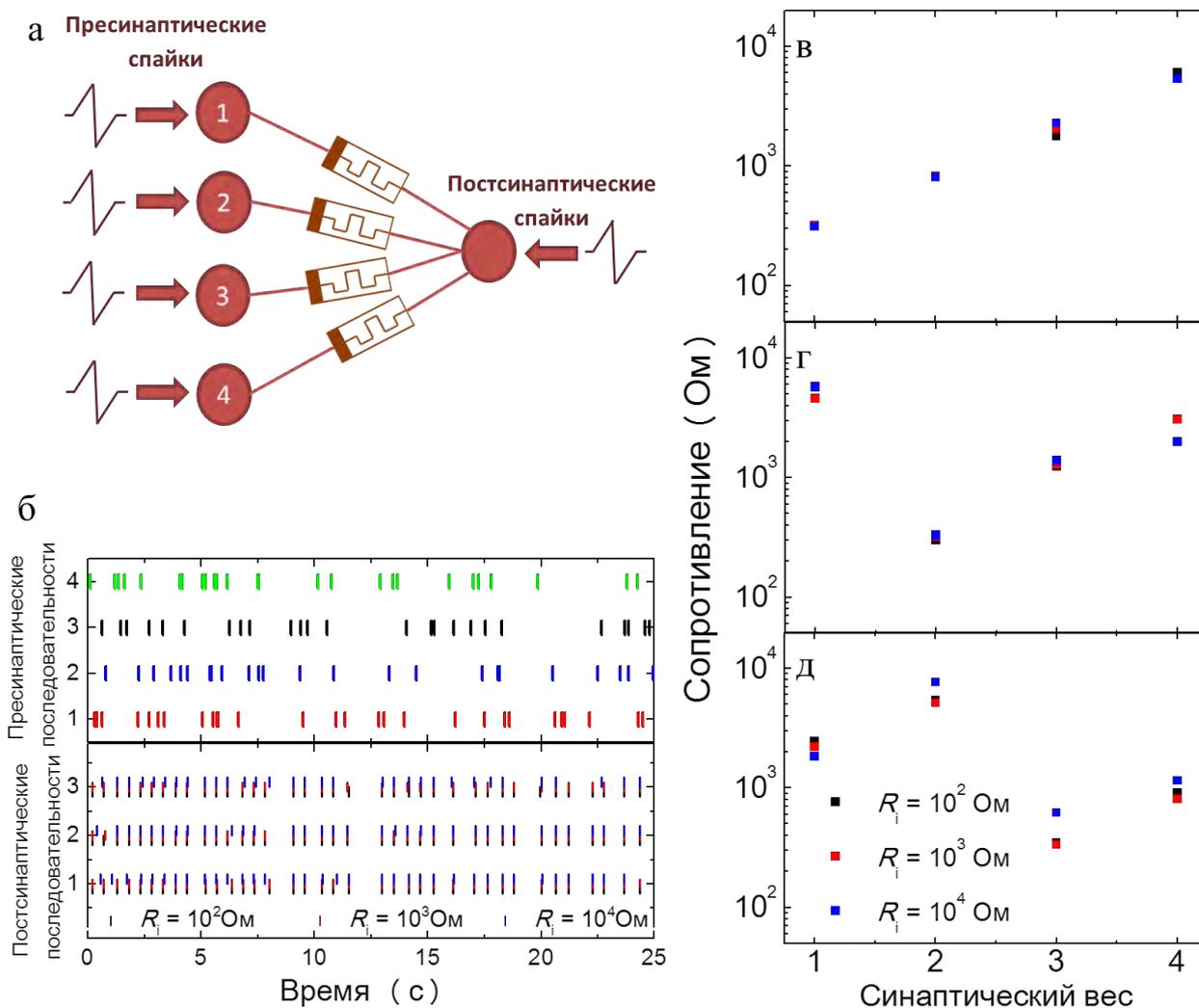


**Рис. 7.** Окна STDP для различных форм спайков и полярности. Схемы во 2-5 столбцах показывают режим нейронов (E - возбуждающий, I - тормозный), графики в строках показывают форму спайков. Каждая часть рисунка представляет собой зависимость изменения проводимости  $\Delta G$  от интервала между спайками  $\Delta t$ .

Такого рода трансформация пластичности качественно аналогична биологическим изменениям окна STDP в присутствии дофамина или других нейромедиаторов. Интересно отметить, что типы кривых окна STDP качественно совпадают для разных форм импульсов и зависят в основном от режимов работы (возбуждающий/тормозный) пары нейронов. Тем самым подтверждается возможность использования для дофаминоподобной модуляции различных форм импульсов со скачкообразным изменением полярности, что может быть полезно в системе с большим количеством аппаратных аналоговых нейронов, формы спайков которых могут заметно варьироваться.

В §4.3 описана разработанная нейроморфная сеть, состоящая из 4-х пресинаптических нейронов, связанных через мемристивные синапсы с постсинаптическим нейроном (рис. 8 а). На примере данной сети было показано, что импульсная нейронная сеть с синаптическими связями на основе мемристивных

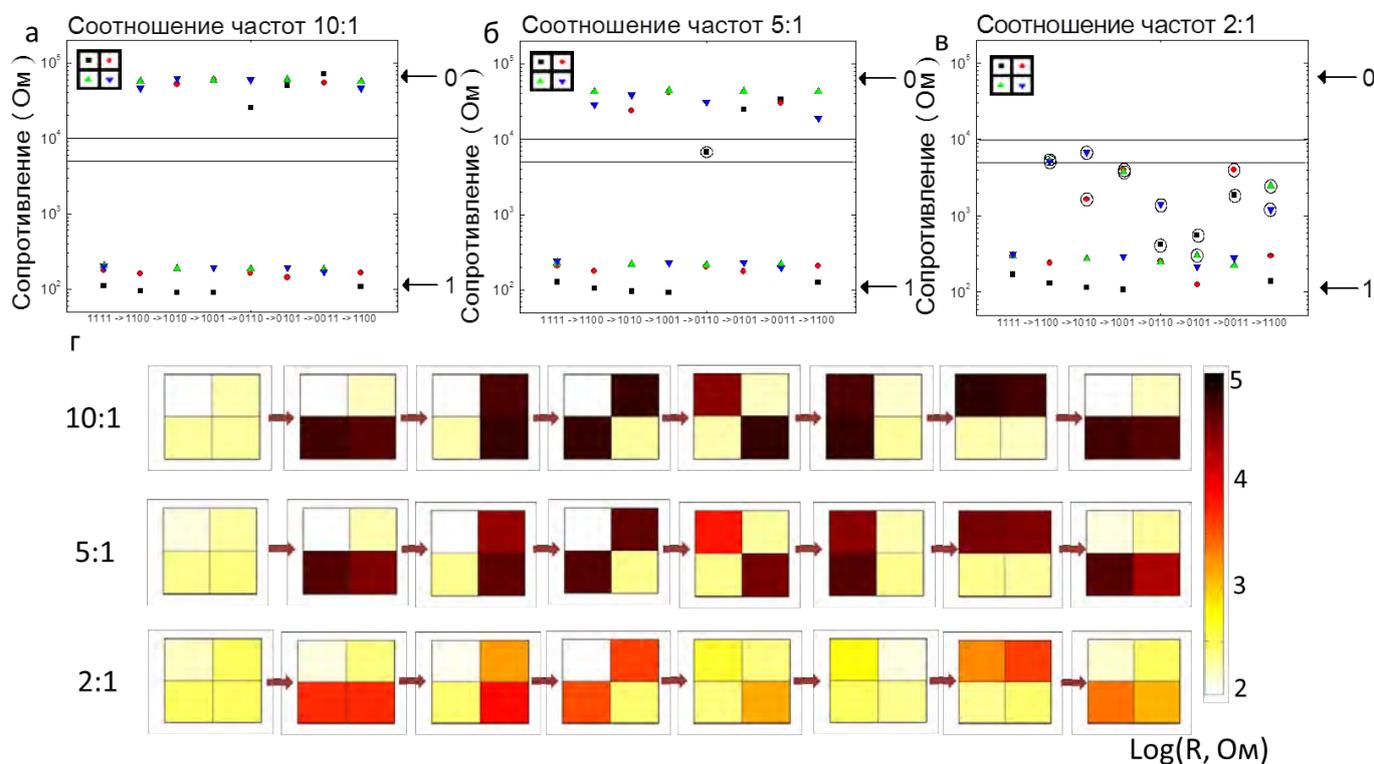
M/НК/M структур способна к самоадаптации [A2], а также к обучению с помощью частотного и временного кодирования образов [A9, A10].



**Рис. 8.** Самоадаптация мемристивной STDP сети. а) Схема нейронной сети. б) 4 пресинаптических последовательности спайков, распределенных по Пуассону и 9 постсинаптических последовательностей соответствующих различным начальным состояниям мемристора:  $R_i = 10^2$  (черный),  $10^3$  (красный) и  $10^4$  Ом (синий), и 3 сериям экспериментов в-д. Итоговое распределение сопротивлений мемристоров: в) серия 1: последовательности 1, 2, 3, 4 (из рис. 4.4б) подаются на веса 1, 2, 3, 4, г) серия 2: последовательности 1, 2, 3, 4 подаются на веса 2, 3, 4, 1, д) серия 3: последовательности 1, 2, 3, 4 подаются на веса 3, 4, 1, 2. Разные цвета символов соответствуют различным начальным весам  $R_i = 10^2, 10^3$  и  $10^4$  Ом.

Суть способности к самоадаптации мемристивной STDP нейроморфной сети, необходимая для ее обучения, заключается в том, чтобы показать, что конечное состояние НВС (после процедуры обучения) зависит только от условий обучения, но не от индивидуальных характеристик мемристора, а также не от его начального состояния. На первом этапе эксперимента все синапсы (мемристоры) были инициализированы с помощью разработанного алгоритма переключения в заданные состояния  $R_i$  с ошибкой

менее 0.5%. На втором шаге к мемристивным синапсам прикладывались предварительно сгенерированные различные последовательности пресинаптических спайков, распределенные по Пуассону, и постсинаптические спайки от порогового нейрона (рис. 8 б), после чего измерялись конечные сопротивления мемристоров. Во второй и третьей сериях эксперимента  $k$ -я последовательность смещалась по кругу и прикладывалась к  $(k+1)$ -ому, а затем и  $(k+2)$ -ому синапсам, соответственно. Полученные синаптические распределения веса представлены на рис. 8 в-д. Из представленных результатов видно, что конечное состояние мемристоров в НВС зависит только от последовательности спайков, но не от самого мемристора или его начального состояния.

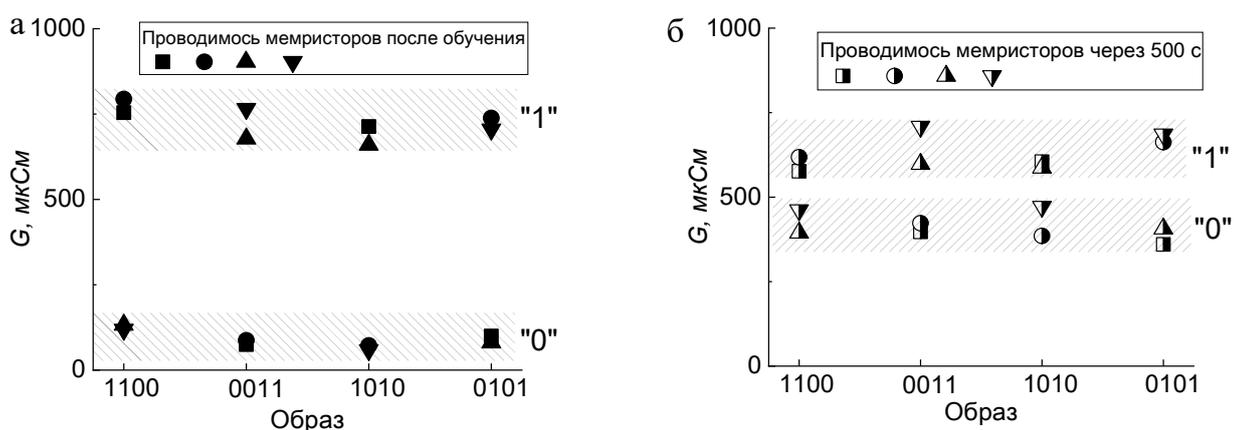


**Рис. 9.** Хеббовское частотно-кодированное обучение. а-в) Итоговое распределение сопротивлений мемристора в зависимости от подаваемых «образов» с соотношением частот: 10:1 (а), 5:1 (б) и 2:1 (в). Ошибочные значения обведены кружками. г) Карта сопротивлений. Верхняя строка отображает результат обучения для случая (а), средняя – (б), нижняя – (в).

В §4.3.2 показана возможность частотного кодирования образов пуассоновскими последовательностями спайков. Оказалось, что если частота достаточно высокая (низкая), то синаптический вес может быть потенцирован (подавлен) с точностью, близкой к 100%. Первоначально все 4 мемристивных синапса были приведены в низкоомное состояние с использованием пошагового алгоритма, которое было выбрано в качестве логического состояния «1». Затем два пресинаптических нейрона генерировали спайки с большей частотой (2 Гц), а два других с меньшей частотой (0.2

Гц). Постсинаптический пороговый нейрон генерировал спайки как описано выше, обеспечивая обучение НВС посредством STDP. После прохождения спайковых последовательностей измерялись конечные резистивные состояния мемристоров, а затем была использована другая комбинация из двух высокочастотных и двух низкочастотных пресинаптических входов. Для всех возможных шести входных комбинаций были выполнены эксперименты по обучению НВС, чтобы проверить воспроизводимость результатов (рис. 9 а, г (верхний ряд)). Полученные результаты показывают способность обучения синапсов при соотношении частот 10:1. С уменьшением соотношения высоких и низких частот точность обучения падает.

В §4.3.3 изучена возможность временного кодирования входного сигнала на примере НВС, которая состояла из четырех пресинаптических нейронов и постсинаптического порогового нейрона-интегратора без утечки, соединенных НК мемристоривными синапсами. На входы подавались различные бинарные образы, состоящие из логических «1» и «0». Кодирование образов было реализовано путем сдвига момента подачи спайка от начала цикла обучения. Для логической «1» спайк подавался в начале цикла, а для логического «0» - через 200 мс при общем периоде одного цикла – 1 с. После 100 циклов обучения отношение проводимостей для 4 различных образов составило  $\sim 10$  (рис. 10а). Затем отношение проводимостей мемристоров в сети анализировалось после временной выдержки; спустя 500 с это отношение составило около 2 (рис. 10б).



**Рис. 10.** Результат обучения импульсной нейроморфной сети сразу после 100 циклов обучения (а) и через 500 с (б).

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы и перспективы ее развития. Основные результаты заключаются в следующем:

1. Показано, что мемристоры М/НК/М имеют сравнительно высокие характеристики, а именно большое количество циклов переключения (более  $10^6$  циклов), соотношение сопротивлений в крайних состояниях ( $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} > 100$ ), длительное время сохранения состояния (более  $10^4$  с).
2. Реализован алгоритм прецизионного переключения мемристоров, основанный на последовательных шагах считывания и записи состояния импульсами с возрастающей амплитудой. Данный алгоритм позволяет устанавливать резистивное состояние с погрешностью менее 0.5 %. При этом случайное изменение длительности импульсов в пределах 10% обеспечивает сходимость процедуры установки резистивного состояния мемристора.
3. Предложен многофиламентарный механизм РП мемристоров на основе НК  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ . Данный механизм основан на движении кислородных вакансий и ионов при приложении электрического поля и формировании большого числа филаментов за счет коалесценции магнитных атомов на центрах нуклеации, в роли которых выступают гранулы металла.
4. Обнаружено, что в слоистых структурах М/НК/ $\text{LiNbO}_3$ /М с наноразмерными слоями НК  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  ( $\approx 10$  нм) и  $\text{LiNbO}_3$  ( $\approx 40$  нм) с увеличением содержания металлической фазы наблюдается резкий переход при  $x \approx 13-14$  ат.% от одно- к многофиламентному характеру резистивного переключения. При малых содержаниях металла плотности гранул недостаточно для формирования перколяционных цепочек и, соответственно, реализации многофиламентного характера переключения, вследствие чего РП происходит по единичным филаментам, в результате чего даже при малых токах через структуру (10-100 мкА) возникает необратимое переключение в проводящее состояние. Также показано, что РП в структурах М/НК/ $\text{LiNbO}_3$ /М со встроенным слоем ниобата лития возникает при содержании металла  $x$ , близким к порогу перколяции для структур М/НК/М без встроенного слоя  $\text{LiNbO}_3$ , когда их ВАХ при увеличении  $x$  трансформируется от нелинейной к линейной, отвечающей закону Ома.
5. Показано, что проводимость НК мемристоров (вес синапса) может изменяться подобно пластичности биологических синапсов типа STDP, т.е. пластичности, зависящей от времени прихода спайков.
6. Предложен способ дофаминоподобной модуляции окна мемристивной STDP, который позволяет имитировать пластичность биологических синапсов в присутствии дофамина и других нейромодуляторов.

7. На основе программных нейронов и мемристивных  $M/(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(LiNbO_3)_{100-x}/M$  структур ( $x \sim 8-15$  ат.%), выступающих в качестве синапсов, разработана простая спайковая НВС и показана ее способность к самоадаптации и обучению с помощью частотного и временного кодирования. Показано, в частности, что конечное состояние мемристоров зависит от последовательности спайков, однако, не зависит конкретного мемристора и его начального состояния. При соотношении частот 5:1 и 10:1 возможно разделение весов для различных комбинаций на входе сети. При временном кодировании также возможно разделение весов при различном сдвиге момента подачи спайка ( $\Delta t = 0-0.2$  с) от начала цикла обучения.

### Публикации по теме диссертации

- A1. **Никируй К.Э.**, Емельянов А.В., Демин В.А., Рыльков В.В., Ситников А.В., Кашкаров П.К. Прецизионный алгоритм переключения мемристора в состояние с заданным сопротивлением // Письма в Журнал технической физики.– 2018.– Т. 44, № 10.– С. 20–28.
- A2. **Никируй К.Э.**, Емельянов А.В., Рыльков В.В., Ситников А.В., Демин В.А. Адаптивные свойства спайковых нейроморфных сетей с синаптическими связями на основе мемристивных элементов // Письма в Журнал технической физики.– 2019.– Т. 45, № 8.– С. 19–23.
- A3. Рыльков В.В., Емельянов А.В., Николаев С.Н., **Никируй К.Э.**, Ситников А.В., Фадеев Е.А., Демин В.А., Грановский А.Б. Транспортные свойства магнитных наногранулированных композитов с диспергированными ионами в изолирующей матрице // Журнал экспериментальной и теоретической физики.– 2020.– Т. 158, № 1(7).– С. 164–183.
- A4. **Никируй К.Э.**, Ильясов А.И., Емельянов А.В., Ситников А.В., Рыльков В.В., Демин В.А. Мемристоры на основе наноразмерных слоев  $LiNbO_3$  и композита  $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(LiNbO_3)_{100-x}$  // Физика твердого тела.– 2020.– Т. 62, № 9.– С. 1562–1565.
- A5. Рыльков В.В., Николаев С.Н., Демин В.А., Емельянов А.В., Ситников А.В., **Никируй К.Э.**, Леванов В.А., Пресняков М.Ю., Талденков А.Н., Васильев А.Л., Черноглазов К.Ю., Веденеев А.С., Калинин Ю.Е., Грановский А.Б., Тугушев В.В., Бугаев А.С. Транспортные, магнитные и мемристивные свойства наногранулированного композита  $(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{100-x}$  // Журнал экспериментальной и теоретической

физики.– 2018.– Т. 153, № 3.– С. 424–441.

A6. Martyshov M.N., Emelyanov A. V., Demin V.A., **Nikiruy K.E.**, Minnekhanov A.A., Nikolaev S.N., Taldenkov A.N., Ovcharov A. V., Presnyakov M.Y., Sitnikov A.V., Vasiliev A.L., Forsh P.A., Granovskiy A.B., Kashkarov P.K., Kovalchuk M. V., Rylkov V. V. Multifilamentary character of anticorrelated capacitive and resistive switching in memristive structures based on  $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  nanocomposite // Phys. Rev. Appl.– 2020.– Vol. 14.– P. 034016.

A7. **Nikiruy K.E.**, Emelyanov A. V., Demin V.A., Sitnikov A.V., Minnekhanov A.A., Rylkov V. V., Kashkarov P.K., Kovalchuk M. V. Dopamine-like STDP modulation in nanocomposite memristors // AIP Adv.– 2019.– Vol. 9.– P. 065116.

A8. **Nikiruy K.E.**, Surazhevsky I.A., Demin V.A., Emelyanov A. V. Spike-Timing-Dependent and Spike-Shape-Independent Plasticities with Dopamine-Like Modulation in Nanocomposite Memristive Synapses // Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.– 2020.– Vol. 217, № 18.– P. 1900938.

A9. Emelyanov A. V., **Nikiruy K.E.**, Serenko A.V., Sitnikov A.V., Presnyakov M.Y., Rybka R.B., Sboev A.G., Rylkov V. V., Kashkarov P.K., Kovalchuk M.V., Demin V.A. Self-adaptive STDP-based learning of a spiking neuron with nanocomposite memristive weights // Nanotechnology.– 2020.– Vol. 31.– P. 045201.

A10. **Никируй К.Э.**, Емельянов А.В., Ситников А.В., Рыльков В.В., Демин В.А. Временное кодирование бинарных образов для обучения импульсных нейроморфных систем на основе нанокompозитных мемристоров // Российские нанотехнологии .– 2021.– Т.16. №6– С. 31-36.

#### Цитируемая литература

1. Wang J., Zhuge F. Memristive Synapses for Brain-Inspired Computing // Adv. Mater. Technol.– 2019.– P. 1800544.

2. Kuzum D., Yu S., Philip Wong H.S. Synaptic electronics: Materials, devices and applications // Nanotechnology.– 2013.– Vol. 24.– P. 382001.

3. Zhang Z., Ma C., Zhu R. A FPGA-based, granularity-variable neuromorphic processor and its application in a MIMO real-time control system // Sensors.– 2017.– Vol. 17.– P. 1941.

4. Schemmel J., Gr A., Meier K., Mueller E. Implementing Synaptic Plasticity in a VLSI Spiking Neural Network Model // 2006 International Joint Conference on Neural Networks.– 2006.– P. 1–6.

5. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. The missing memristor found // *Nature*.– 2008.– Vol. 453.– P. 80–83.
6. Prezioso M., Merrih-Bayat F., Hoskins B.D., Likharev K., Strukov D.B. Self-Adaptive Spike-Time-Dependent Plasticity of Metal-Oxide Memristors // *Sci. Rep.*– 2016.– Vol. 6.– P. 21331.
7. Xia Q., Yang J.J. Memristive crossbar arrays for brain-inspired computing // *Nat. Mater.*– 2019.– Vol. 18.– P. 309–323.
8. Del Valle J., Ramírez J.G., Rozenberg M.J., Schuller I.K. Challenges in materials and devices for resistive-switching-based neuromorphic computing // *J. Appl. Phys.*– 2018.– Vol. 124, № 21.– P. 211101.
9. Демин В.А., Емельянов А.В., Калинин Ю.Е., Кашкаров П.К., Копытин М.Н., Ситников А.В., Рыльков В.В. Способ формирования синаптического мемристора на основе нанокompозита металл-нестехиометрический оксид. Патент РФ на изобретение № 2666165 от 02.11.2017 г. Опубликовано: 06.09.2018, Бюл. № 25.
10. Ielmini D. Resistive switching memories based on metal oxides: Mechanisms, reliability and scaling // *Semicond. Sci. Technol.*– 2016.– Vol. 31, № 6.– P. 063002.
11. Lee J.S., Lee S., Noh T.W. Resistive switching phenomena: A review of statistical physics approaches // *Appl. Phys. Rev.*– 2015.– Vol. 2.– P. 031303.
12. Li Y., Wang Z., Midya R., Xia Q., Yang J.J., Xia Q., Joshua Yang J. Review of memristor devices in neuromorphic computing: materials sciences and device challenges // *J. Phys. D. Appl. Phys.*– 2018.– Vol. 51, № 50.– P. 0–12.
13. Tan S.H., Lin P., Yeon H., Choi S., Park Y., Kim J. Perspective: Uniform switching of artificial synapses for large-scale neuromorphic arrays // *APL Mater.*– 2018.– Vol. 6, № 12.
14. Choi B.J., Torrezan A.C., Norris K.J., Miao F., Strachan J.P., Zhang M.X., Ohlberg D.A.A., Kobayashi N.P., Yang J.J., Williams R.S. Electrical performance and scalability of Pt dispersed SiO<sub>2</sub> nanometallic resistance switch // *Nano Lett.*– 2013.– Vol. 13.– P. 3213–3217.
15. Li W., Liu X., Wang Y., Dai Z., Wu W., Cheng L., Zhang Y., Liu Q., Xiao X., Jiang C. Design of high-performance memristor cell using W-implanted SiO<sub>2</sub> films // *Appl. Phys. Lett.*– 2016.– Vol. 108.– P. 153501.
16. Banerjee W., Liu Q., Hwang H. Engineering of defects in resistive random access memory devices // *J. Appl. Phys.*– 2020.– Vol. 127.– P. 051101.