

## ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

# Мемристоры для нейроморфных вычислительных систем: основные параметры и способы их оптимизации

А.С. Ильин, А.Н. Мацукатова, М.Н. Мартышов, А.В. Емельянов, В.В. Рыльков,  
В.А. Демин, П.А. Форш, П.К. Кашкаров, М.В. Ковальчук

*В последние годы в научном сообществе сохраняется высокий интерес к нейроморфным вычислительным системам на основе мемристивных устройств, благодаря их уникальным преимуществам. В то же время, несмотря на наличие большого многообразия мемристоров, пока ещё не создано устройство с оптимальными характеристиками для использования в нейроморфных вычислениях. В статье представлены сведения об основных видах и параметрах мемристивных устройств. Рассмотрены мемристоры, переключающиеся по механизмам изменения валентности, электрохимической металлизации, фазового перехода, сегнетоэлектрического туннельного и спин-туннельного эффектов. Проанализированы основные характеристики, достоинства и недостатки каждого вида мемристоров. Представлены основные пути совершенствования характеристик мемристоров, связанные с оптимизацией состава и структуры мемристивных устройств, схемотехническими и алгоритмическими решениями.*

**Ключевые слова:** мемристоры, механизмы переключения, типы мемристоров, оптимизация характеристик

PACS numbers: 07.05.Mh, 87.18.Sn, 87.19.L–

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.09.040037>

## Содержание

1. Введение (369).
  2. Мемристоры и принципы их работы (371).
  3. Основные параметры мемристоров для нейроморфных вычислений (373).
  4. Основные подходы оптимизации параметров и характеристик нейроморфных вычислительных систем на мемристивных устройствах (375).
  5. Заключение (380).
- Список литературы (380).

А.С. Ильин<sup>(1,a)</sup>, А.Н. Мацукатова<sup>(1,2,b)</sup>, М.Н. Мартышов<sup>(1,c)</sup>,  
А.В. Емельянов<sup>(1,2,3,d)</sup>, В.В. Рыльков<sup>(2,e)</sup>, В.А. Демин<sup>(1,2,f)</sup>,  
П.А. Форш<sup>(1,g)</sup>, П.К. Кашкаров<sup>(1,2,3,h)</sup>, М.В. Ковальчук<sup>(1,2,3,i)</sup>

<sup>(1)</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,

Ленинские горы 1, стр. 2, 119991 Москва, Российская Федерация

<sup>(2)</sup> Национальный исследовательский центр

"Курчатовский институт",

пл. Академика Курчатова 1, 123182 Москва,

Российская Федерация

<sup>(3)</sup> Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет),

Институтский пер. 9, 141701 Долгопрудный,

Московская обл., Российская Федерация

E-mail: <sup>(a)</sup> [ilinas@my.msu.ru](mailto:ilinas@my.msu.ru), <sup>(b)</sup> [an.matcukatova@physics.msu.ru](mailto:an.matcukatova@physics.msu.ru),

<sup>(c)</sup> [mmartyshov@mail.ru](mailto:mmartyshov@mail.ru), <sup>(d)</sup> [emelyanov.andrey@mail.ru](mailto:emelyanov.andrey@mail.ru),

<sup>(e)</sup> [vvrylkov@mail.ru](mailto:vvrylkov@mail.ru), <sup>(f)</sup> [demin.vyacheslav@mail.ru](mailto:demin.vyacheslav@mail.ru),

<sup>(g)</sup> [phorsh@mail.ru](mailto:phorsh@mail.ru), <sup>(h)</sup> [p.kashkarov@mail.ru](mailto:p.kashkarov@mail.ru), <sup>(i)</sup> [koval@nrcki.ru](mailto:koval@nrcki.ru)

Статья поступила 14 июля 2025 г.,

после доработки 19 сентября 2025 г.

## 1. Введение

Нейроморфные вычислительные системы (НВС) — это системы, которые имитируют структуру и функции биологических нейронных сетей (например, человеческого мозга) для выполнения интеллектуальных вычислений [1–5]. НВС отличаются от традиционных компьютеров архитектурой, которая ближе к биологическим системам, и могут быть реализованы на программном, аппаратном и гибридном уровнях. При этом НВС стремятся воспроизвести ключевые аспекты биологических нейронных сетей, такие как параллельные и совмещённые обработка и хранение информации, энергоэффективность, адаптивность и обучение. Основными элементами НВС являются искусственные нейроны и синапсы. Нейроны обрабатывают входные сигналы и генерируют выходные импульсы (спайки). Синапсы регулируют силу связей между нейронами (веса синапсов) и, соответственно, амплитуду передаваемых сигналов. Изменение синаптических весов позволяет сети обучаться и адаптироваться к пространственно-временной структуре входных данных.

Основой аппаратной реализации цифровых НВС, как и для традиционных электронных устройств, являются кремниевые комплементарные металл–оксид–полупроводниковые (КМОП) технологии [6–15]. На основе этих технологий разрабатываются специализированные процессоры для поддержки нейронных сетей, например, тензорные и полностью цифровые нейроморфные процессоры (Google TPU, Алтай, Akida, Intel Loihi 2, IBM Northpole). Однако, несмотря на множество преимуществ,

ществ, КМОП процессорные системы имеют ряд существенных недостатков для использования в НВС. К ним можно отнести задержки при передаче данных, связанные с необходимостью их перемещения между арифметико-логическим устройством процессора и отдельным модулем памяти (как внутрипроцессорной, так и, тем более, внепроцессорной), что заметно ограничивает производительность и повышает тепловое энерговыделение [16–19]. Также нельзя не отметить высокое энергопотребление КМОП-микросхем, связанное, в том числе, с утечками тока даже в выключенном состоянии и, соответственно, со значительным тепловыделением в процессе работы и ожидания [3, 8, 20].

Перспективными элементами для реализации искусственных синапсов в НВС представляются мемристоры (сопротивления с эффектом памяти) [16, 21, 22]. Последние способны изменять свое сопротивление в зависимости от поданного напряжения и протекающего через них заряда [23, 24], что делает их весьма эффективными для имитации синаптической пластичности — ключевого механизма обучения в биологических нейронных сетях [25–28]. При этом мемристоры могут принимать множество промежуточных значений сопротивления [29, 30], что позволяет точно задавать синаптические веса (практически в аналоговом режиме) и обеспечивает возможность обучения. Кроме того, состояние мемристора с установленным значением сопротивления может сохраняться в течение длительного времени без какого-либо внешнего воздействия, имитируя долговременную память биологического синапса [31]. Мемристоры способны работать при малых напряжениях, обладают малой площадью и, соответственно, незначительной паразитной ёмкостью и могут переключаться между резистивными состояниями за наносекунды, тем самым обеспечивая энергоэффективность, высокую плотность и скорость обработки данных и аппаратной настройки весов [32–35].

Изначально понятие мемристор было введено Леоном Чуа ещё в начале 1970-х годов [36, 37]. Он проанализировал соотношения, связывающие между собой переменные величины в электрических цепях (сила тока, напряжение, заряд и магнитный поток) через характеристики трёх существующих фундаментальных двухполюсных элементов (сопротивление, индуктивность и ёмкость). В результате Леон Чуа сделал вывод о том, что из соображений полной симметрии должен существовать четвёртый фундаментальный элемент цепи, который бы связывал электрический заряд  $q$  и магнитный поток  $\Phi$  (рис. 1). Этот элемент и получил название "мемристор". Предложенная концепция не использовалась почти 40 лет, пока не была опубликована статья [38] с заявлением об экспериментальном открытии недостающего мемристора.

Следует отметить, что многие учёные высказывают сомнения по поводу соответствия активно исследуемых в настоящее время мемристорам и мемристорам, существование которых было предсказано Л. Чуа [24, 39–41]. Это обосновывается прежде всего тем, что работа мемристоров никак не связана с магнитным потоком, о котором писалось в пионерской работе Л. Чуа. Кроме того, фундаментальное рассмотрение этого вопроса с использованием уравнений Максвелла показывает, что существование нового фундаментального элемента, связывающего магнитный поток и заряд, по-видимому невоз-

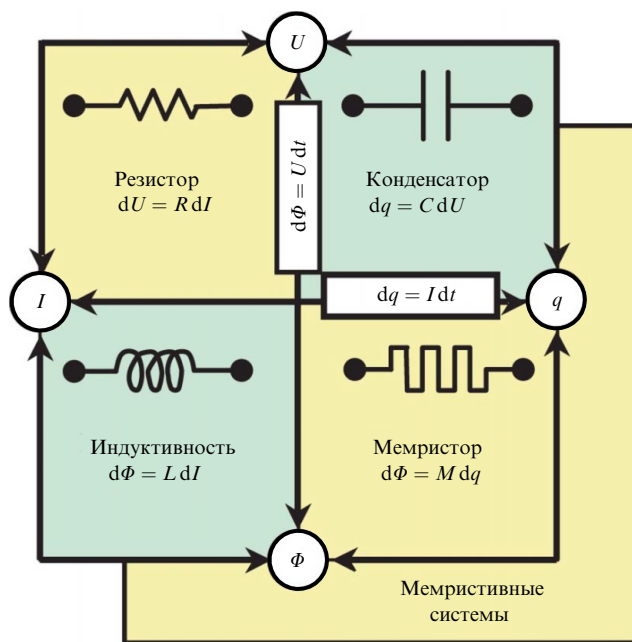


Рис. 1. Четыре фундаментальных двухполюсных элемента цепи, связывающие между собой силу тока, напряжение, заряд и магнитный поток согласно теории Леона Чуа [38].

можно. Тем не менее, подобное несоответствие никак не ограничивает перспективы использования мемристоров в современном их понимании в различных практических приложениях.

Хотя мемристоры обладают огромным потенциалом для применения в области НВС, их широкое внедрение сдерживается рядом технических проблем. Прежде всего к ним можно отнести значительный разброс параметров мемристоров (например, разброс значений сопротивления) из-за особенностей резистивного переключения и недостаточного совершенства производственных процессов [33, 42–44]. Это усложняет их использование в крупных массивах. Кроме того, после достаточно большого количества циклов переключения параметры мемристоров могут деградировать, что ограничивает их долговечность и надёжность [45, 46]. Также сопротивления мемристоров в процессе хранения или считывания подвержены случайным флуктуациям (шумам), что снижает точность вычислений и требует разработки сложных алгоритмов коррекции ошибок [47]. Однако в некоторых случаях шумы могут играть конструктивную роль, например, в задачах криптографии, генерации случайных последовательностей, удержания следов памяти и др. [48–51].

Для решения указанных проблем используют различные подходы и методы. Во-первых, оптимизируют состав и структуру активных переключающих слоёв, как правило, с помощью легирования, целенаправленного создания дефектов или внедрения наночастиц. Оптимизация активных слоёв также может осуществляться за счёт применения многослойных функциональных структур, создания градиента по стехиометрии, формирования резервуара вакансий кислорода, теплоаккумулирующего слоя и др., или подбора специальных сплавов и эвтектик электродов [52–60]. Перспективным направлением также является использование в качестве активного слоя двумерных материалов (графена,  $\text{MoS}_2$  и др.) [61,

62]. Во-вторых, разрабатывают различные схемотехнические и алгоритмические решения, такие как улучшение архитектуры и адресации массива мемристивных элементов и/или методов их переключения [33, 63]. Также активно развиваются научные направления, связанные с изучением фотонных [64] и квантовых мемристоров [65–68].

В настоящей работе даётся обзор различных типов мемристоров и принципов их работы с целью анализа их достоинств и недостатков. Приведены данные об основных параметрах и характеристиках мемристоров различных типов; представлены способы совершенствования их функциональных свойств, полезные при ключевых применениях мемристивных элементов в качестве синаптических весов НВС.

## 2. Мемристоры и принципы их работы

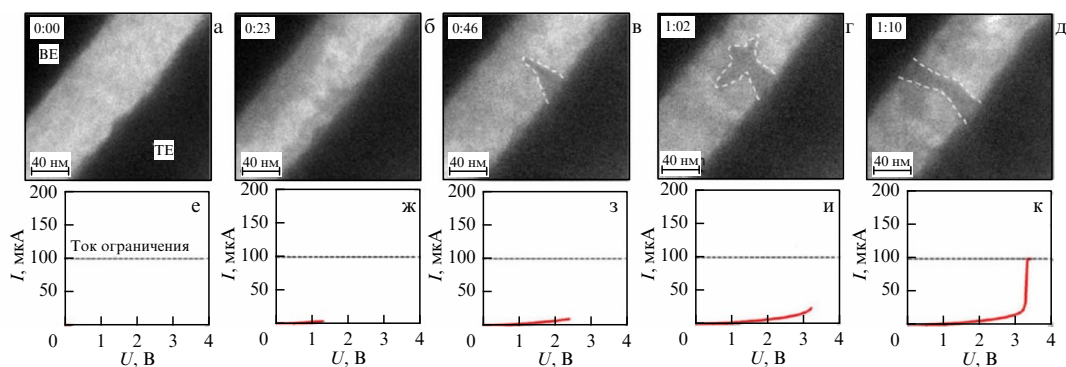
Мемристор — это нелинейный электронный элемент, способный изменять свое сопротивление в зависимости от приложенного напряжения и прошедшего через него заряда и сохранять это состояние после отключения питания [38]. Мемристор обычно представляет собой плёночную структуру с двумя электродами. В настоящее время исследовано достаточно большое количество различных мемристивных структур, многообразие которых можно классифицировать различными способами: по волатильности их переключений (волатильные, или энергозависимые, и неволатильные, или энергонезависимые), по полярности (униполярные и биполярные), а также по механизму резистивного переключения (РП), что является, наверное, наиболее интересной классификацией с точки зрения физических основ их функционирования. Выделяют несколько основных используемых в НВС механизмов РП: изменение валентности (движение заряженных вакансий окисляющего элемента (кислорода, азота и др.)), электрохимическую металлизацию (движение катионов металла), фазовые переходы, электрическую поляризацию, туннельное магнетосопротивление [69–72].

Переключение вследствие изменения валентности, которое происходит за счёт локальных перескоков в электрическом поле анионов плёнки (ионов кислорода) между свободными узлами решётки, что эквивалентно

движению вакансий этого элемента в противоположном направлении, является одним из основных механизмов в оксидах металлов (например,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  и др.). Под действием внешнего электрического поля может произойти миграция отрицательно заряженных ионов (анионов) кислорода из кристаллической решётки к положительно смещенному электроду структуры с образованием на их месте положительно заряженных дефектов (кислородных вакансий), выступающих в роли легирующих примесей. За счёт этого, в области, где появились вакансии кислорода, увеличивается концентрация носителей заряда, и, соответственно, увеличивается проводимость. В результате, из появившихся дефектов образуется тонкий проводящий филамент, который замыкает электроды структуры и переводит её из высокоомного состояния  $R_{\text{off}}$  в низкоомное  $R_{\text{on}}$ . При изменении полярности внешнего напряжения ионы кислорода возвращаются, окисляя проводящие пути, что приводит к обратному переходу структуры в высокоомное состояние. В основе этого механизма лежат окислительно-восстановительные реакции (редокс-процессы), которые изменяют валентность катионов металлов в оксиде, поэтому его часто называют механизмом изменения валентности (Valence Change Mechanism, VCM) [73].

Несмотря на то, что описанные выше процессы происходят на атомарных масштабах, с помощью высоко-разрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) удалось наблюдать за ростом кислородно-обеднённого филамента и подтвердить предполагаемый механизм переключения [74, 75]. На рисунке 2 приведена серия изображений ПЭМ, демонстрирующая образование проводящего филамента в плёнке  $\text{ZnO}$  при увеличении поданного напряжения [75]. Также под каждым изображением ПЭМ приведена соответствующая часть вольт-амперной характеристики (ВАХ). Рисунок наглядно подтверждает, что переключение из высокоомного в низкоомное состояние происходит за счёт образования проводящего филамента.

При этом РП в VCM мемристорах могут отличаться. На рисунке 3 приведены примеры ВАХ с различными РП. Как видно из рис. 3а, переключение из высокоомного состояния в низкоомное происходит при разных полярностях приложенного напряжения. Такой режим работы



**Рис. 2.** Серия изображений ПЭМ плёнки  $\text{ZnO}$  в обкладке из Pt электродов в процессе увеличения подаваемого на неё напряжения положительного знака относительно электрода ТЕ: (а) исходное состояние  $\text{ZnO}$ ; (б) состояние при подаче небольшого напряжения (контрастность вблизи обоих электродов увеличилась); (в) с увеличением приложенного напряжения вблизи электрода ТЕ появляется часть филамента (нити) конической формы; (г) нить принимает дендритную форму, но по-прежнему не достигает электрода БЕ; (д) филамент (нить) проходит через электрод БЕ, плёнка переключается в проводящее состояние  $R_{\text{on}}$ ; (е–к) соответствующие изображения зависимости тока от напряжения, показывающие, что переключение происходит за счёт образования филаментов. Пунктирной линией на графиках е–к обозначен ток ограничения [75].

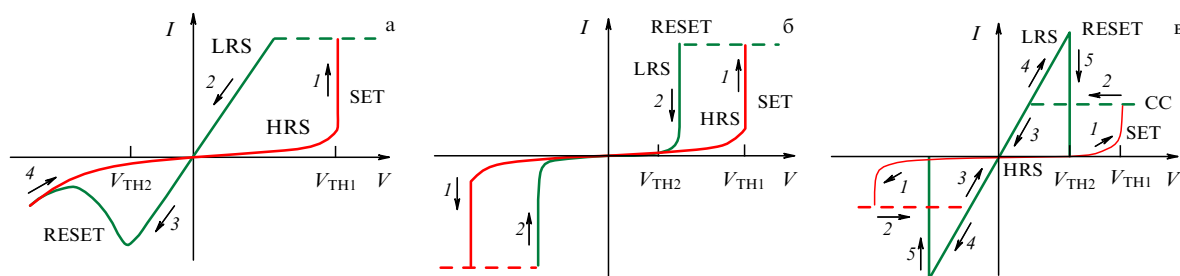


Рис. 3. (а) Вольтамперные характеристики мемристора при биполярном переключении, (б) униполярном переключении и (в) униполярном переключении в режиме ограничения токов;  $V_{TH1}$ ,  $V_{TH2}$  — напряжения переключения в низкоомное (LRS, операция SET) и высокоомное (HRS, операция RESET) состояния, соответственно [85].

мемристора называется биполярным. При этом при отключении напряжения сопротивление структуры не изменяется (так, например, после переключения из  $R_{off}$  в  $R_{on}$  сопротивление структуры останется в состоянии  $R_{on}$  после отключения напряжения). Данный режим называется энергонезависимым (неволатильным, nonvolatile). Неволатильный режим необходим для реализации синаптических связей в НВС [76]. На рисунке 3б показан другой случай, структура переходит из  $R_{on}$  в  $R_{off}$  без смены полярности напряжения. Данный режим РП называется униполярным и в данном конкретном случае является энергонезависимым (волатильным, volatile), поскольку возврат из низкоомного состояния (LRS) в высокоомное состояние (HRS) всегда происходит при снижении напряжения ниже некоторого порогового значения  $V_{TH2} < V_{TH1}$  той же (но произвольно выбранной) полярности. Такой режим может быть использован для реализации селекторов пассивных кроссбар-матриц [77] или динамического слоя резервуарной вычислительной системы (PBC) [78]. Отметим, что для некоторых структур возможно сосуществование волатильного и неволатильного режимов при контроле максимально возможного тока через структуру (тока ограничения) и/или внешней температуры [79–81]. Для ряда активных материалов мемристора, например, NiO может наблюдаться униполярное РП, когда операция сброса (RESET) выполняется импульсом той же полярности, что и в режиме установки (SET) [82–84]. При этом операции перехода из низкоомного в высокоомное состояние и обратно требуют разных токов ограничения (так называемое, пороговое переключение). ВАХ такого мемристора имеет вид, изображенный на рис. 3в. В униполярных мемристорах ключевую роль для создания/разрушения проводящего филамента играет джоулев нагрев.

Следует также отметить, что существуют мемристоры, в которых РП не связано с образованием филаментов, а происходит по всей площади за счёт изменения барьера Шоттки на границе между электродом и активным слоем или вероятности туннелирования через активный слой [86]. В случае органических мемристоров с электролитным затвором РП происходит за счёт электрохимической реакции также по всему объёму активной плёнки [87, 88]. Такой тип РП иногда называют интерфейсным (в противоположность филаментарному).

Механизм электрохимической металлизации (electrochemical metallization, ECM) основан на переносе катионов металлов и окислительно-восстановительных реакциях в простых планарных или сэндвич-структурах металл–диэлектрик–металл (МДМ) [89–91]. Для пере-

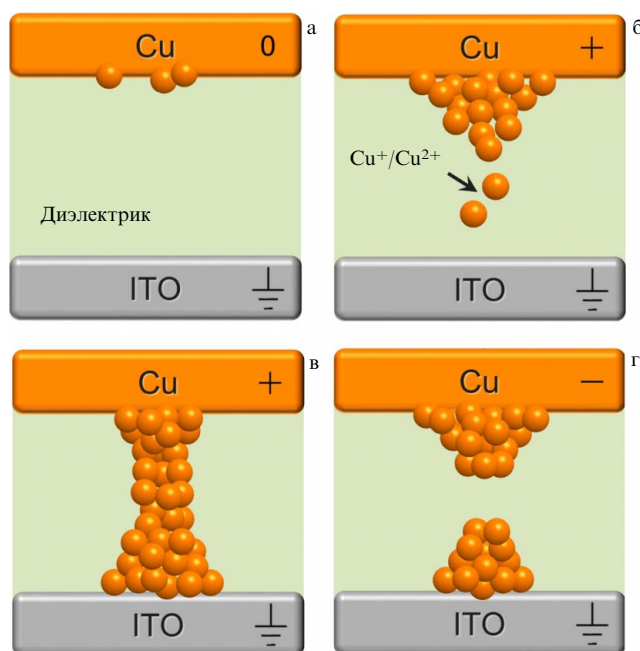


Рис. 4. Схематическое представление принципов работы ECM мемристоров: (а) начальное состояние МДМ мемристивной структуры; (б) приложение положительного напряжения к верхнему электроду приводит к электромиграции катионов металла через диэлектрическую матрицу и образованию зародыша металлического филамента на нижнем; (в) при достаточно высоком напряжении (выше потенциала восстановления металла) металлический мостик соединяет два электрода, и мемристивная структура переключается в состояние  $R_{on}$ ; (г) приложение напряжения обратной полярности приводит к разрыву металлического мостика и возвращению в состояние  $R_{off}$  [91].

ключения МДМ структуры по данному механизму один из электродов (будем называть его верхним) должен быть электрохимически активным (окисляемым), например, Ag или Cu [90], а второй электрод (нижний) — инертным, например, ITO или Pt (рис. 4). При приложении положительного напряжения к верхнему электроду происходит окисление атомов электрода и образование катионов металла. Диэлектрик между электродами служит матрицей, в которой происходит электромиграция катионов металла под действием внешнего электрического поля (рис. 4б). Достигнув нижнего электрода, катионы металла восстанавливаются на нем, формируя металлический мостик (филамент) между двумя электродами, что переключает мемристор в состояние  $R_{on}$  (рис. 4в). Когда к верхнему электроду прикладывается напряжение обратной полярности, самая тонкая часть проводящего мо-

стика разрушается из-за джоулева нагрева и/или эффекта электронного ветра (рис. 4г) [92]. При этом часть катионов возвращается на верхний электрод, а мемривная структура переключается в состояние  $R_{\text{off}}$ .

Мемривные структуры, в которых переключения происходят за счёт фазового перехода активного слоя (phase change memory, PCM), создаются чаще всего на основе халькогенидных материалов, например,  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  [93, 94]. При подаче униполярных импульсов напряжения и, следовательно, джоулевым нагреве PCM материалы демонстрируют обратимый переход из аморфной фазы в кристаллическую фазу, сопротивления которых различны [95, 96]. Когда к элементу прикладывается напряжение, превышающее напряжение  $U_0$ , необходимое для запуска процесса плавления в активном слое, внутри халькогенидного материала происходит локальное плавление, что приводит к переходу в аморфную фазу и переключению в высокоомное состояние. В противном случае, если приложенное напряжение ниже  $U_0$ , осуществляется постепенная кристаллизация материала за счёт джоулева тепла, что обеспечивает перевод в низкоомное состояние. При этом возможно получение состояний PCM мемривора с промежуточным сопротивлением, лежащим между  $R_{\text{on}}$  и  $R_{\text{off}}$ . Отметим, что PCM структуры также могут переключаться под действием лазерных или достаточно сильных световых импульсов для реализации оптических НВС [97, 98].

Функционирование мемриворов с сегнетоэлектрическим туннельно-прозрачным активным слоем (ferroelectric tunneling junction, FTJ) связано с возможностью изменять электрическую поляризацию сегнетоэлектриков путём приложения внешнего электрического поля. При этом поляризация материала зависит от предыстории поляризации и сохраняется в отсутствие внешнего электрического поля. При приложении электрического поля макроскопические области сегнетоэлектрика с одинаковым направлением дипольных моментов (домены) ориентируются по направлению приложенного поля. Изменением полярности внешнего электрического поля можно повернуть поляризацию получившегося монодомена сегнетоэлектрика на  $180^\circ$  и получить две различные поляризации сегнетоэлектрика. При этом переключение сегнетоэлектрической поляризации в структуре FTJ вызывает изменение высоты барьера для туннелирования электронов через слой сегнетоэлектрика, а, следовательно, и изменение сопротивления структуры. Значения  $R_{\text{off}}$  и  $R_{\text{on}}$  FTJ структур отличаются на несколько порядков [99–101]. Часто в качестве сегнетоэлектриков используют легированный  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$  или  $\text{HfAlO}_x$ , и перовскиты [102–105]. За последние годы была предложена более оптимальная структура FTJ устройств, металл–ван-дер-ваальсовый сегнетоэлектрик–графен, которая помогает справиться со сложной задачей контролируемого изменения барьера на границе металл–сегнетоэлектрик [106, 107].

В мемриворах на основе спин-туннельного эффекта (spin-transfer torque, STT) используются два слоя из ферромагнитного материала, разделённых туннельно-прозрачной диэлектрической прослойкой (часто в этой роли выступает кристаллический  $\text{MgO}$  [108]). Один из магнитных слоёв имеет фиксированную ориентацию намагниченности, тогда как другой слой, магнитомягкий, способен легко перемагничиваться между двумя противоположными ориентациями магнитного момента [109].

Путём пропускания спин-поляризованного тока через туннельный переход, можно изменять ориентацию намагниченности магнитомягкого слоя. Сопротивление структуры мало, если намагниченности слоёв направлены в одну сторону и возрастает при встречной ориентации намагниченностей.

### 3. Основные параметры мемриворов для нейроморфных вычислений

К основным параметрам мемриворов, определяющим эффективность их применения в НВС, относятся разброс значений резистивных состояний как от цикла к циклу, так и от устройства к устройству, максимальное количество различимых состояний (пластичность) и их время хранения (удержания), диапазон изменения сопротивления ( $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ ), максимальное количество циклических РП без существенной деградации (выносливость), скорость РП и необходимая для этого энергия, минимальный размер элемента, масштабируемость и совместимость с современными кремниевыми технологическими процессами. Применительно к созданию больших транзисторно-управляемых массивов мемриворов важную роль играют малые напряжения РП отдельных элементов ( $< 3$  В) и значительное их сопротивление в ON состоянии ( $> 10$  кОм).

Разброс значений резистивных состояний мемриворов (высокоомного, низкоомного и промежуточных), связанный со стохастичностью процессов, определяющих РП, является одной из ключевых проблем, ограничивающих применение мемриворов в нейроморфных вычислениях (например, для некоторых задач неопределённость установки резистивного состояния в 5 % может полностью разрушить сходимость обучения) [110]. Например, в случае мемриворов, переключающихся по механизму изменения валентности или электрохимической металлизации, вариативность значений  $R_{\text{on}}$  и  $R_{\text{off}}$  связана со случайными перестановками атомов при возникновении/разрушении филаментов, ветвлением филаментов из-за конкуренции между ионной миграцией и электростатическими силами, образованием филаментов в случайных точках с максимальной напряжённостью поля, неоднородным контактом электродов с активным слоем. Это приводит к разбросу значений сопротивлений в 9–10 % (оцениваемому как удвоенное отношение суммы стандартных отклонений логарифмов сопротивлений в крайних состояниях к разности их, логарифмов, средних значений [73]) при циклических переключениях [111]. Примерно такой же разброс значений наблюдается и у PCM мемриворов [112]. В этом случае причиной разброса параметров является стохастичность процесса кристаллизации – аморфизации, связанная с неконтролируемыми скоростью охлаждения расплава и размерами зародышей кристаллической фазы. Минимальным разбросом в значениях сопротивлений ( $< 1$  %) обладают STT мемриворы [113].

Пластичность, или способность мемриворов плавно и обратимо изменять сопротивление между крайними состояниями  $R_{\text{on}}$  и  $R_{\text{off}}$  в ответ на внешние стимулы (напряжение, ток), имеет принципиальное значение для имитации аналогового поведения биологических синапсов [114]. В литературе предложено несколько вариантов алгоритмов переключения мемривора в состояние с заданным сопротивлением. Один из них заключается в ис-

пользовании дополнительных элементов цепи, в частности, резисторов [115], которые выступают в качестве делителя напряжения. И хотя такой способ переключения позволяет увеличить устойчивость к циклическим РП [116], существенными его недостатками являются косвенное управление итоговым сопротивлением мемристора и использование дополнительных элементов цепи, что повышает энергопотребление и затраты на аппаратные ресурсы и площадь микросхемы. Другой вариант переключения мемристора в состояние с заданным сопротивлением основан на подаче импульсов напряжения с плавно растущей амплитудой [117]. В этом методе текущее сопротивление мемристора приближают к заданному значению путём увеличения амплитуды подаваемых импульсов постоянной длительности на небольшое значение. Знак амплитуды импульса определяется знаком разности между текущим сопротивлением и заданным. Вариации данного метода, основанные на случайным образом изменяющейся длительности импульсов [118] или тонкой регулировке резистивного состояния импульсами с малой амплитудой [30] позволяют повышать точность настройки заданного состояния. В то же время, модуляция амплитуды и/или длительности импульсов также обуславливает существенный перерасход аппаратных ресурсов процессора. В этой связи наиболее подходящим для установки значений представляется метод подачи на мемристор серии коротких последовательных импульсов одинаковой амплитуды и длительности с постепенным изменением его сопротивления. В этом варианте получаются так называемые кривые долговременной потенциации (кривая роста проводимости в зависимости от числа поданных импульсов) и долговременной депрессии проводимости (под действием серии импульсов, плавно переводящих мемристор в  $R_{\text{off}}$ ) [73]. Такой подход, однако, требует весьма низкого разброса напряжений процессов SET и RESET, поскольку импульсы напряжения с аппаратно фиксированными параметрами (амплитудой и длительностью) могут не подойти для всех элементов массива мемристорных ячеек.

Для определения времени удержания промежуточных состояний мемристор переводится в целевое промежуточное состояние, напряжение записи/стирания отключается, а сопротивление далее измеряется через фиксированные интервалы времени. При этом фиксируется время, за которое сопротивление изменяется (самопроизвольно, т.е. под действием внутренних динамических процессов) более чем на 10 % от исходного значения. Для экстраполяции времени удержания проводятся измерения при повышенной температуре. Зависимость времени хранения от температуры соответствует закону Аррениуса. По такой экстраполяции время удержания лучших мемристоров может достигать 10 лет и более [119].

Для мемристоров, переключающихся по механизму изменения валентности или электрохимической металлизации, время удержания зависит от энергии активации миграции ионов [33, 45]. В РСМ мемристорах ключевой фактор — энергия активации кристаллизации [120]. Чем выше энергия активации кристаллизации, тем дольше сохраняется состояние. Высокая анизотропия свободного слоя (например, CoFeB) увеличивает время удержания состояния в STT мемристорах [18]. В сегнетоэлектрических мемристорах главным фактором, влияющим на время удержания состояния, является величина коэрцитивной силы [106].

Большим количеством промежуточных состояний (более 50) и длительным временем их удержания (экстраполированное время удержания состояний более 10 лет) обладают VCM и ЕСМ мемристоры (с тенденцией к большему времени удержания для VCM элементов), а также РСМ мемристоры (экстраполированное время удержания состояний  $\sim 10$  лет и количество состояний более 15) [119, 121]. Значительно меньшее число промежуточных состояний характерно для FTJ и SST мемристоров, при этом FTJ имеют и малое время удержания состояний (порядка 2–3 дней).

Заметные различия в значениях  $R_{\text{on}}$  и  $R_{\text{off}}$  позволяют добиваться большего количества промежуточных значений сопротивления мемристора и, тем самым, получать значительное число возможных синаптических весов при использовании в НВС. Довольно высокие отношения  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$  демонстрируют FTJ устройства ( $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} > 10^7$ ) и ЕСМ мемристоры ( $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} > 10^5$ ) [106, 122]. Также неплохим диапазоном значений сопротивления обладают РСМ и VCM мемристоры, отношения  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$  для которых лежат в интервале  $10^2 - 10^4$  [123, 124]. Наиболее низкими значениями  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$  обладают STT мемристоры.

Также важным параметром мемристоров для их применений в НВС является выносливость (endurance) к циклическим РП. Выносливость определяется максимальным количеством переключений, при котором сохраняется "окно сопротивлений" между высокоомным и низкоомным состояниями (отношение  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ ) или, например, между промежуточным и низкоомным состояниями [125].

Ограничение числа устойчивых резистивных переключений связано со структурной "усталостью" материала. Особенно сильно это выражено в окислительно-восстановительных системах и системах с фазовым переходом. Для окислительно-восстановительных систем необратимые изменения в значениях сопротивлений при циклических переключениях связаны с нежелательными окислительно-восстановительными реакциями на электродах, неконтролируемым разрастанием филаментов и нежелательной диффузией атомов [126]. В случае РСМ мемристоров происходит фазовая сегрегация внутри расплава и возникают механические напряжения при процессах кристаллизации – аморфизации, способные привести, в том числе, к появлению структурных дефектов [127, 128]. Спин-туннельные мемристоры обладают большей долговечностью, благодаря электронному механизму РП (без смещения ионов при переключении) [73]. Для всех рассматриваемых в статье типов мемристоров, кроме сегнетоэлектрических, число циклов переключения для лучших представителей классов превышает  $10^{11} - 10^{12}$  [113, 129, 130]. В FTJ мемристорах зарегистрированное количество циклов РП не превышает  $10^7$  [131].

Небольшая энергия переключения и высокая скорость переключения выгодны практически для всех типов вычислений, особенно для приложений, требующих частого программирования устройств. Скорость переключения в мемристорах определяется структурой используемых материалов, физическими механизмами РП и внешними условиями (приложенным напряжением, температурой) [73]. В случае мемристоров, переключающихся по механизму изменения валентности или электрохимической металлизации, время переключения чаще всего лимитируется скоростью диффузии ионов (время РП обратно пропорционально коэффициенту диффузии).

В РСМ мемристорах время переключения зависит от скорости зарождения и роста кристаллической фазы, а в STT и FTJ мемристорах — от скорости изменения магнитной и электрической поляризации соответственно. Поскольку изменение магнитной поляризации требует минимальных смещений атомов, то STT мемристорам необходима, как правило, небольшая энергия для переключения. В VCM и ECM мемристорах потребляемая энергия сильно зависит от энергии активации миграции ионов: чем выше энергия активации, тем больше энергии требуется для переключения.

На данный момент созданы VCM, ECM, РСМ и FTJ мемристоры с потребляемой энергией переключения  $\sim 10$  фДж [132–134]. В STT мемристорах энергия переключения может быть снижена до 10 фДж [135]. Максимальную скорость переключения ( $< 90$  пс) имеют VCM мемристоры [136]. В РСМ мемристорах можно достичь скорости переключения  $\sim 700$  пс, а в SST мемристорах  $\sim 200$  пс [137, 138]. Наименьшим быстродействием обладают FTJ мемристоры, их время переключения обычно превышает 10 нс [132]. Однако следует отметить, что обычно, чем выше скорость переключения, тем меньше время удержания резистивных состояний и более низкую циклическую выносливость демонстрирует мемристор. Это связано с вышеуказанным энергоактивационным механизмом РП и для практического использования требуется поиск оптимального баланса соответствующих характеристик.

Высокая плотность интеграции элементов увеличивает портативность и уменьшает стоимость НВС. Масштабируемость мемристоров — ключевое преимущество, делающее их перспективными для пост-кремниевой электроники. Так, были продемонстрированы кроссбар-структуры на основе  $\text{HfO}_2/\text{TiO}_x$  с критическим размером 2 нм и полушагом между элементами 6 нм [139]. Также мемристоры на базе  $\text{TaO}_x$  были интегрированы в интегральные микросхемы с объёмом памяти 7,2 Мбит с критическим размером 22 нм [140]. В большинстве случаев ЕСМ устройства являются масштабируемыми благодаря своим локализованным каналам проводимости. Масштабируемость мемристоров с фазовым переходом была достигнута при использовании электродов из углеродных нанотрубок с площадью контакта  $\sim 5 \text{ nm}^2$  [134, 141]. На STT мемристорах продемонстрирована мегабитная интеграция на 22-нм и 28-нм технологических процессах с возможностью масштабирования до размеров менее 10 нм [142–144]. Сегнетоэлектрические мемристоры на основе  $\text{BaTiO}_3$  могут быть миниатюризированы до 20 нм с помощью наноостровковых электродов из Ag [145]. Также была продемонстрирована возможность создания 3D мемристорных структур: были изготовлены восьмислойные трёхмерные вертикальные матрицы на основе  $\text{TiN}/\text{HfO}_2/\text{TaO}_x/\text{Ti}/\text{TiN}/\text{W}$  [146, 147]. Следует отметить, что масштабирование мемристорных устройств, как правило, приводит к снижению энергопотребления [148]. Ключевыми проблемами при масштабировании мемристоров являются локальный перегрев за счёт большой плотности мощности, электростатические помехи, увеличение разброса параметров. Кроме того важно, чтобы основные параметры достигались именно для КМОП-интегрированных мемристорных устройств. Данное требование необходимо ввиду того, что для управления мемристорами (ячейками ReRAM памяти) и выполнения вспомогательных логических опе-

раций и коммутации в НВС по-прежнему чаще всего используются нижеописанные КМОП-транзисторные слои интегральной микросхемы НВС [149].

#### 4. Основные подходы оптимизации параметров и характеристик нейроморфных вычислительных систем на мемристорных устройствах

Ежегодно создаётся довольно большое количество новых мемристоров, функционирующих в рамках одного из вышеописанных механизмов РП. Исследователи подбирают все более оптимальные материалы и совершенные структуры, опираясь на разработанные модели функционирования мемристоров. На данный момент, несмотря на многообразие мемристорных устройств, всё ещё нет мемристора, который бы с практической точки зрения подходил по всем своим характеристикам для внедрения в НВС. Среди основных подходов к улучшению характеристик НВС на основе мемристоров можно выделить дизайн материалов и структуры мемристоров и разработку новых схемотехнических решений и архитектур нейроморфных систем. Первый подход направлен на создание мемристорных систем с оптимальными параметрами для использования в НВС, а второй связан с уменьшением негативного вклада от несовершенства мемристоров в эффективность функционирования НВС. Рассмотрим эти подходы подробнее, сосредоточившись в основном на усовершенствовании материалов и структуры мемристоров.

Одним из методов улучшения параметров мемристоров является инженерия дефектов. Так, например, создание дислокаций в мемристорных структурах позволяет контролировать локализацию прорастания филаментов и тем самым уменьшать разброс мемристорных характеристик. При этом в мемристорной структуре появляются своеобразные каналы с гораздо большим коэффициентом диффузии проводящих ионов, чем в окружающей матрице [150, 151]. Рост филаментов происходит преимущественно по этим каналам, что способствует стабилизации мемристорных параметров. Таким образом удаётся добиться хорошо повторяющихся РП, а дисперсия напряжений переключения может составлять всего 1% [151].

Также, повысить эффективность работы мемристора можно путём легирования [152–154]. Например, в случае мемристора на основе оксида цинка можно заметно увеличить отношение  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$  путём введения в ZnO атомов Cr [152]. Авторы [152] связывают это с изменением концентрации вакансий кислорода в ZnO в результате легирования.

В случае мемристоров на основе оксида металла образование дефектов типа кислородных вакансий изменяет стехиометрию оксида, что позволяет контролировать характеристики мемристора. Одним из способов варьирования плотности кислородных вакансий является ионное облучение. В работе [155] численное моделирование показало, что радиационное облучение мемристоров на основе оксида с помощью облучения  $\alpha$ -частицами значительно изменяет синаптические веса в нейронной сети с мемристорными синапсами, что позволяет оптимизировать её характеристики. Экспериментальное подтверждение значительного улучшения характеристик мемристоров на основе диоксида титана в результате

облучения  $\alpha$ -частицами продемонстрировано в работе [156]. Показано, что облучение  $\alpha$ -частицами приводит к увеличению стабильности состояний мемристора почти в три раза, отношение  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$  при этом увеличивается более чем в два раза, а срок службы — в 1,5 раза.

Ещё один способ, позволяющий оптимизировать параметры мемристоров, заключается в использовании материалов с пористой структурой в роли активного слоя VCM и ЕСМ мемристоров. При переключении в таких мемристорах замыкается/разрывается филамент между двумя электродами, причём чем тоньше образовавшийся филамент, тем меньше токи нужны для его замыкания/разрыва и, соответственно, тем меньше энергопотребление таких мемристоров. С другой стороны, тонкие филаменты нестабильны и легко изменяют свою морфологию при РП, постепенно уширяясь и разрастаясь. Пористая структура активного материала мемристора может выступать ограничителем ширины филаментов, направляя и контролируя их. В качестве пористого материала могут выступать, например, цеолиты. Так, в работе [157] была исследована структура  $\text{Ag/LTA} - \text{zeolite/Al}$ , переключающаяся по механизму электрохимической металлизации. Для лучшего контроля над РП в цеолит добавлялись зародыши металлических мостиков (филаментов) — катионы  $\text{Ag}^+$ . При этом в порах цеолита образовывались  $\text{Ag}$  кластеры. При приложении положительного напряжения к верхнему электроду таких мемристоров катионы из него диффундируют по порам цеолита и восстанавливаются на  $\text{Ag}$  кластерах, постепенно заполняя поры и образуя металлический мостик, соединяющий электроды (рис. 5а). С другой стороны, при приложении напряжения обратной полярности мостики разрушаются. При этом в порах остаются изолированные  $\text{Ag}$  кластеры, и мемристор возвращается в своё первоначальное высокоомное (рис. 5б) или промежуточное состояние (рис. 5в). Таким образом удаётся контролировать морфологию металлических мостиков и не давать им разрастаться (в данном случае отверстия пор составляют лишь 0,41 нм). Благодаря такой структуре энергопотребление мемристоров на основе  $\text{Ag/LTA} - \text{zeolite/Al}$  составляет менее 10 фДж.

Высокоэнтропийные мульти-металлические (из смеси пять или более металлов) оксидные системы могут выступать в роли активного слоя VCM мемристоривной структуры для уменьшения стохастичности мемристоривных характеристик и увеличения времени удержания резистивных состояний и выносливости мемристоров [158]. Так как каждый элемент такой оксидной системы имеет свою кристаллическую структуру, при их смешении образуется достаточно сильно искажённая решётка. Вакансии кислорода чрезвычайно медленно диффундируют по такой решётке, что приводит к увеличению времени удержания резистивных состояний ( $> 20$  ч при  $100^\circ\text{C}$ ) и большому количеству стабильных во времени состояний. Более того, так как в высокоэнтропийных оксидах смешаны элементы различных валентностей, такие оксиды электронейтральны, и вакансии кислорода распределяются равномерно по активному слою мемристоривной структуры. Равномерное распределение вакансий приводит к уменьшению вариативности мемристоривных характеристик (дисперсия напряжения переключения  $\sim 7\%$ ).

Стабильность РП увеличивается при внедрении в основной диэлектрический слой мемристоривной структуры тонкого металлического буферного слоя, например,

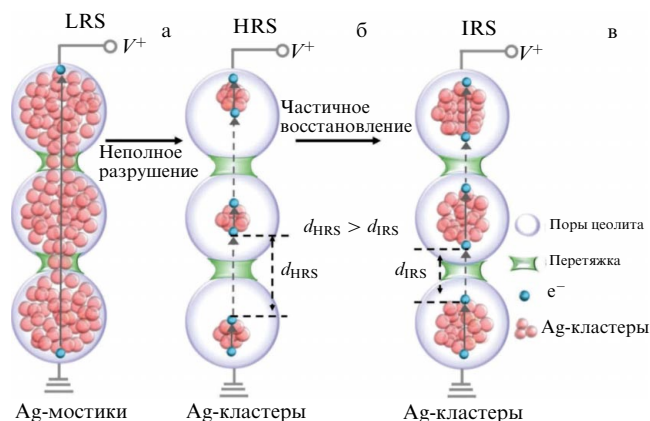


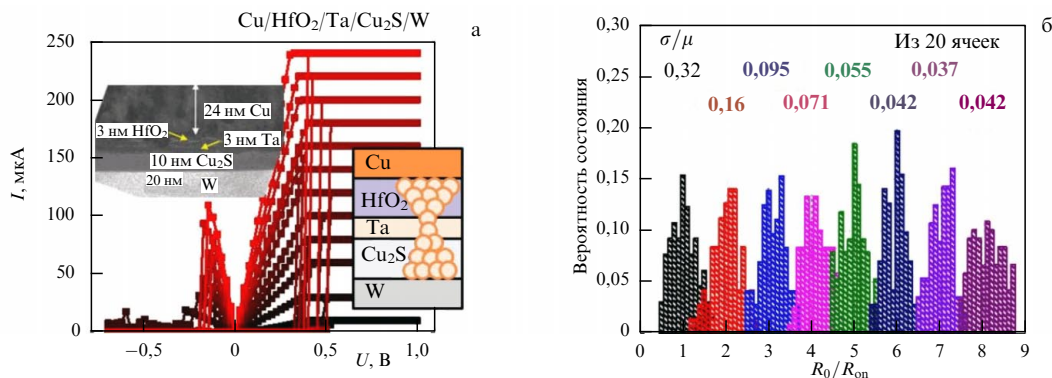
Рис. 5. Схематичное изображение мемристора на основе  $\text{Ag/LTA} - \text{zeolite/Al}$  в состояниях (а)  $R_{\text{on}}$ , (б)  $R_{\text{off}}$  и (в) промежуточном состоянии [157].

$\text{Cr}$ ,  $\text{Pt}$ ,  $\text{Cu}$  [53, 159, 160]. При этом между внедренным металлическим слоем и основным диэлектрическим слоем мемристора может образоваться дефектный пограничный слой, влияющий на перенос носителей заряда, попадающих в него [159]. Кроме этого, внедрение металлического слоя приводит к уменьшению диэлектрического слоя, в котором происходит РП, что также стабилизирует мемристоривные характеристики, например, уменьшает напряжения переключения и их дисперсию [53, 159].

В случае структур металл – наноккомпозит – металл на основе металл-оксидных наноккомпозитов переход в проводящее состояние должен определяться перколяционными цепочками, заданными пространственным положением и концентрацией наногранул металла в матрице композита. Поэтому устойчивость к РП в этом случае оказывается высокой, а механизм РП — многофиламентарным [47, 160, 161].

Металлический слой может играть также роль диффузионного барьера для катионов в ЕСМ мемристорах. При "быстрой" диффузии катионов из верхнего электрода может образоваться чрезмерное количество проводящих мостиков и/или слишком толстые мостики, которые будет тяжело разорвать и переключить структуру в состояние  $R_{\text{off}}$ . Поэтому, например, можно использовать тонкий слой  $\text{Ta}$ , который ограничит инжекцию катионов  $\text{Cu}$  в диэлектрический слой структуры  $\text{Cu/HfO}_2/\text{Ta}/\text{Cu}_2\text{S}/\text{W}$  (рис. 6) [161]. В такой мемристоривной структуре удастся устанавливать резистивные состояния с хорошей точностью, ограничивая максимальный ток через структуру (усредненная дисперсия резистивных состояний  $R_{\text{on}}$ , полученных при различных токах ограничения,  $\sim 10\%$ ). Данный подход работает также и для органических ЕСМ мемристоров [162].

К оптимизации параметров мемристоров может привести не только модификация активного слоя, но и изменение состава металлических электродов. Использование композита  $\text{Hf} - \text{In} - \text{Sn} - \text{O}$  вместо оксида индия – олова (ITO) в качестве верхнего электрода в мемристорах на основе оксида цинка уменьшает энергопотребление, увеличивает стабильность работы мемристора и отношение  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$  [163, 164]. А в работах [165, 166] показано, что помимо материала нижнего электрода важную роль для стабильности РП играет адгезионный металлический слой.



**Рис. 6.** Мемристивные структуры на основе  $\text{Cu}/\text{HfO}_2/\text{Ta}/\text{Cu}_2\text{S}/\text{W}$ : (а) типичные ВАХ с изображениями структуры (схематичное и ПЭМ изображения); (б) распределения  $R_{\text{on}}$  при установке с разными токами ограничения ( $R_0$  — квант электрического сопротивления или константа фон Клитцинга,  $\sim 12,9$  кОм) [161].

Эффективным методом улучшения параметров мемристоров является внедрение в активный слой наночастиц [47]. Наночастицы при этом могут выступать в роли центров для захвата зарядов [167, 168]. Так в мемристорах на основе наночастиц  $\text{Ni}-\text{Au}$  никель легко окисляется на воздухе, таким образом на поверхности наночастиц появляются кислородные вакансии [167]. Эти вакансии при приложении внешнего напряжения могут обуславливать появление дополнительного нескомпенсированного заряда, изменяя барьер Шоттки на границе раздела между слоем изолирующей фазы с наночастицами и нижним электродом (в рассматриваемом случае  $\text{SrTiO}_3$ , легированный Nb) и переключая мемристор в состояние  $R_{\text{off}}$ . При приложении напряжения обратной полярности кислородные вакансии ионизируются, что приводит к сужению барьеров Шоттки и переключению в состояние  $R_{\text{on}}$ . Подобный механизм РП наблюдается и в некоторых других структурах, например, в структуре на основе коллоидных наночастиц оксида цинка в полимерной матрице [169].

Кроме этого, металлические наночастицы могут выступать в роли концентраторов электрического поля в слое диэлектрика, задавая и фиксируя направление образования филаментов (в VCM мемристорах) или металлических мостиков (в ECM мемристорах). Так, внедрение слоя Pt наночастиц в слой  $\text{TiO}_2$  приводит к уменьшению дисперсии напряжения переключения  $U_{\text{set}}$  от  $\sim 60\%$  до  $\sim 10\%$ , а также увеличению времени удержания резистивных состояний [170]. А в структурах на основе нанокомпозита  $(\text{Co}-\text{Fe}-\text{B})_x(\text{LiNbO}_3)_{1-x}$  с прослойкой чистого  $\text{LiNbO}_3$  показано, что высокая воспроизводимость и многоуровневость РП достигается за счёт образования перколяционных цепочек из металлических наногранул, пространственно фиксирующих расположение филаментов [54, 171, 172].

К улучшению параметров мемристора может привести внедрение равномерного слоя металлических наночастиц или упорядоченно распределённых по активному слою гомогенных наночастиц [173–178]. В работе [173] подчёркивается, что внедрение слоя Ru наночастиц в слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  приводит к уменьшению дисперсии сопротивлений  $R_{\text{off}}$  от 76% до 13%. Также металлические гомогенные наночастицы могут быть внедрены в непосредственной близости от верхнего или нижнего электрода, таким образом создавая зародыши металлических мостиков [174].

Одним из способов борьбы с разбросом параметров VCM мемристоров является использование многослойных структур (stack engineering). Идея заключается в том, чтобы попытаться максимально ограничить все стохастические механизмы, разделив процесс переключения на несколько частей путём создания многослойных материалов. Для уменьшения стохастического разброса параметров использовались структуры  $\text{HfO}_x/\text{TiO}_x/\text{HfO}_x/\text{TiO}_x$  [179],  $\text{HfO}_x/\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{Ti}$  [127, 180],  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{TaO}_x\text{Ny}/\text{TiN}$  [181] и  $\text{Pt}/\text{Al}/\text{TiO}_x/\text{HfO}_2/\text{AlN}/\text{Pt}$  [182]. В области нейроморфных приложений комбинация  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_{2-x}$  была успешно применена в качестве переключающего слоя в нейронной сети для классификации изображений [34].

В последнее десятилетие большое внимание уделяется созданию мемристоров на основе двумерных материалов. Некоторые исследования показывают, что процессу РП способствуют границы зерен, присутствующие в таких материалах [183–185]. Кроме того, эти материалы обладают широким разнообразием электронного спектра, охватывающим полуметаллическое, полупроводниковое и изоляционное состояния в зависимости от их атомного состава [186]. Двумерные материалы могут быть объединены в многослойную структуру. Каждый слой такой структуры образован ковалентно-связанными атомами, а между слоями действуют ван-дер-ваальсовы силы [187]. Толщину такой структуры можно точно регулировать, поскольку её изменение является дискретным, т.е. определяется количеством слоёв. Такая конфигурация позволяет изготавливать мемристоры с очень тонкими слоями изолятора, чтобы ограничить стохастические процессы, связанные с переключением. Это значительно помогает уменьшить варибельность при циклических переключениях [188]. Кроме того, комбинация двумерных материалов с различными свойствами позволяет добиваться необходимых характеристик мемристора.

Дихалькогениды переходных металлов как типичные 2D-материалы широко изучались в мемристивных устройствах [189, 190]. Например, в 2015 г. сообщалось о мемристоре на основе  $\text{MoS}_2$ , а в 2022 г. мемристоры на основе  $\text{MoS}_2$  с крайне низкой варибельностью параметров были успешно использованы в качестве искусственных синапсов [191, 192]. В 2019 г. был создан мемристор на гетероструктуре  $\text{MoSe}_2/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Устройство обеспечивало пороговое переключение и имитировало синаптические

скую пластичность при облучении в ближнем инфракрасном диапазоне [193]. Мемристоры на основе гетероструктуры  $\text{MoSe}_2/\text{MoS}_2$  демонстрируют хорошие биполярные характеристики резистивного переключения с низким разбросом параметров и имитируют синаптическую пластичность [194]. Была также реализована структура  $\text{Mo}/\text{MoSe}_{(x<2)}/\text{MoSe}_2$  с относительно стабильными параметрами РП за счёт использования контролируемой диффузии Se [195].

Несмотря на то, что большинство исследовательских групп до сих пор акцентирует свое внимание на неорганических мемристорах, эффект резистивного переключения был продемонстрирован и для структур на основе органических материалов: электроактивных полимеров, полимерных смесей, малых органических молекул, полимеров, выступающих в роли матриц для органических и неорганических наноразмерных структур, и других гибридных структур [196, 197]. При этом механизмы РП, описанные в разделе 2, применимы и для органических мемристоров, хотя существуют механизмы РП, свойственные преимущественно органическим структурам, например, РП в результате конформационных переходов [71].

К достоинствам органических мемристоров можно отнести малую стоимость производства и простоту их изготовления, гибкость и биосовместимость, что перспективно для создания носимой и имплантируемой электроники [198]. С помощью молекулярного дизайна возможна настройка электрических, оптических и механических свойств органических материалов, что чрезвычайно важно для создания контролируемых мемристивных структур [199, 200]. Кроме этого, органические мемристивные структуры почти не уступают неорганическим по основным мемристивным характеристикам [201]. Однако, и у органических мемристоров есть свои слабые стороны. К основным недостаткам большинства органических мемристоров можно отнести низкую воспроизводимость характеристик от цикла к циклу и от устройства к устройству, стохастичность РП, низкое время удержания резистивных состояний, относительно низкое значение  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$  и меньшую в сравнении с неорганическими мемристорами термостабильность [71, 201].

Как и в случае неорганических мемристоров, параметры органических мемристоров могут быть улучшены путём внедрения неорганических наночастиц в органическую матрицу (т.е. путём создания гибридных органико-неорганических структур). Так, в работах [170, 202] было показано, что внедрение наночастиц серебра в мемристоры на основе поли-(*n*-ксиллена) (ППК) приводит к меньшему разбросу напряжений переключения и большему количеству стабильных циклов переключений из одного состояния в другое и обратно, а также более низкому энергопотреблению. На рисунке 7 представлена выносливость мемристивных структур на основе ППК и ППК-Ag. Мемристивные структуры с Ag наночастицами демонстрируют не менее 6000 стабильных циклов РП из состояния  $R_{\text{off}}$  в  $R_{\text{on}}$  и обратно, что более чем на порядок превосходит значение, достигнутое для структур на основе чистого ППК ( $\sim 300$ ). Металлические наночастицы Ag в слое ППК формируют перколяционные цепочки, концентрируют поле и задают направление образования проводящего мостика. При этом частично подавляется стохастический характер РП, повышается их стабильность и уменьшается напряжение, необходимое для переключения. К аналогичным результатам приво-

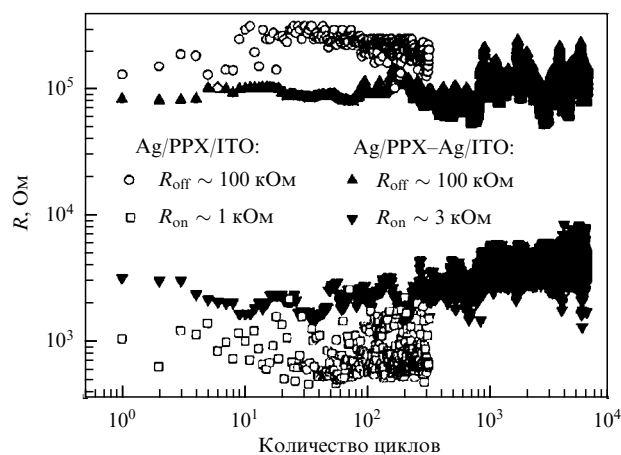


Рис. 7. Выносливость к циклическим переключениям мемристивных структур на основе чистого ППК (пустые круги и квадраты) и ППК с наночастицами серебра (закрашенные треугольники) [170].

дит внедрение в матрицу ППК полупроводниковых наночастиц (например,  $\text{MoO}_x$ ,  $\text{PbTe}$ ), причём разброс характеристик становится меньше 10 % [56, 203].

Также хорошие результаты получаются при использовании органико-неорганических гибридных перовскитов. Проводящие нити в этом типе мемристоров образуются в результате миграции галогенид-ионов (например,  $\text{I}^-$  и  $\text{Cl}^-$ ). Галогидные вакансии (такие как вакансии йода) были идентифицированы как основной тип дефектов, ассоциированных с подвижными ионами (точно так же, как вакансии кислорода в мемристорах на основе оксидов металлов). Чжу и соавторы продемонстрировали память на основе  $\text{MAPbI}_3$  с высоким соотношением  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ , равным  $10^7$  [204]. Они подтвердили, что эффект РП в слое  $\text{MAPbI}_3$  зависит от наличия вакансий йода. Улучшение параметров РП в таких системах может быть достигнуто соответствующим подбором электродных материалов. В работе [205] сообщается о создании мемристора на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ . Ячейка продемонстрировала низкое рабочее напряжение в 0,1 В, способность к длительному хранению и различные стабильные уровни сопротивления.

Ещё один способ оптимизации параметров органических мемристоров связан с добавлением в структуру двумерных слоёв. Так, в 2019 г. была продемонстрирована возможность уменьшения стохастичности характеристик мемристоров на основе ППК путём внедрения в структуру барьерного графенового слоя [206]. С одной стороны, графеновый барьерный слой ограничивает диффузию ионов из верхнего электрода, не допуская прохода чрезмерного количества ионов металла в слой ППК и образования больших металлических мостиков, которые затем сложно разрывать напряжением обратной полярности. С другой стороны, так как ионы могут диффундировать в слой ППК только через нанопоры, присутствующие в структуре графена, то увеличивается контроль над местоположением металлических мостиков и, соответственно, уменьшается вариативность РП.

Ещё одна распространённая стратегия борьбы с разбросом параметров мемристивных устройств любых типов заключается в последовательном подключении транзистора к мемристорам, так называемая 1T1R схема доступа (рис. 8) [35, 63, 207–209]. Роль транзистора за-

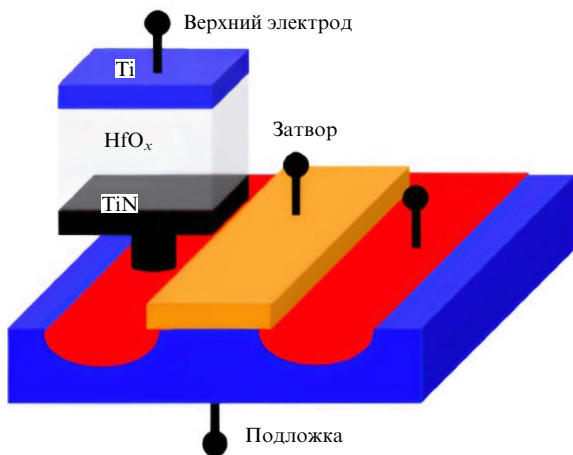


Рис. 8. Схематичное изображение структуры 1T1R. В роли мемристора выступает структура Ti/HfO<sub>x</sub>/TiN, которая последовательно соединена с истоком полевого транзистора [209].

ключается в том, чтобы заставить мемристор работать только в небольшом диапазоне напряжений, сведя к минимуму влияние вариабельности. Также транзистор позволяет предотвратить токи шунтирования (sneak path current) в массиве кроссбар-мемристоров посредством изолированной записи/считывания каждого отдельного мемристора матрицы (произвольная адресация элементов в ReRAM массиве). Также используются комплементарные структуры, в которых с одним транзистором соединяются два последовательно включенных мемристора (1T2R), а напряжение считывается в точке между двумя мемристорами [210]. При использовании этой конфигурации информация хранится в виде соотношения сопротивлений обоих мемристоров, а не в одном устройстве, что уменьшает разброс параметров при циклических переключениях. Кроме того, существуют работы, в которых для доступа к мемристорам используется более одного транзистора, что улучшает стабильность и воспроизводимость таких устройств как в процессе их производства (защита от повреждения ионной бомбардировкой, статическим пробоем и т.п.), так и во время функционирования (стабильное воспроизведение многозарядных состояний, защита от температурных и полевых вариаций) [211]. Вместо транзистора может быть использовано и другое устройство, так называемый селектор (1S1R структура), в качестве которого могут выступать диоды, элементы с фазовым переключением и др. [212–214].

Следует также отметить, что улучшение некоторых характеристик может дать использование не двухэлектродных мемристоров, а мемристоров с тремя электрическими выводами. В качестве примера на рис. 9 приведена структура электрохимической памяти с произвольным доступом (electrochemical random access memory, ECRAM), состоящая из МДП-транзистора, в котором в качестве диэлектрического слоя выступает твердотельный электролит на основе оксинитрида фосфора лития (LiPON) [215, 216]. Работа устройства основана на интеркаляции/деинтеркаляции ионов в канальном слое для настройки проводимости устройства. Интеркаляция ионов Li<sup>+</sup> в слой WO<sub>3</sub> осуществляется путём приложения положительного напряжения к затвору, что приводит к увеличению проводимости устройства, в то время как

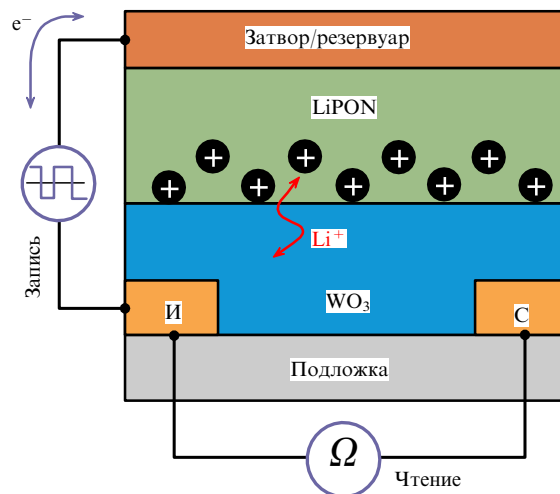


Рис. 9. Электрохимическое запоминающее устройство с произвольным доступом (ECRAM), в котором проводимость канала регулируется перемещением ионов Li<sup>+</sup> [215].

деинтеркаляция ионов Li<sup>+</sup> при отрицательном смещении приводит к снижению проводимости. Отмечается, что в роли подзатворного диэлектрика могут выступать и органические материалы, такие как поли(3,4-этилендиоксифен):полистиролсульфонат (PEDOT:PSS) [217]. Линейное изменение проводимости в ECRAM возможно благодаря разделению путей чтения/записи, что делает концепцию этого устройства очень привлекательной для синаптических приложений, в основном для аппаратной реализации синаптических весов в искусственных нейронных сетях, где аналоговые и симметричные обновления веса играют решающую роль. Кроме того, устройство, исследованное в [215], обеспечивает низкое энергопотребление и быструю работу в наносекундном масштабе времени, тем самым открывая путь к значительному ускорению процесса обучения при аппаратной реализации искусственных нейронных сетей.

Вариабельность параметров мемристоров можно также компенсировать посредством создания подходящей архитектуры искусственных нейронных сетей. При использовании в искусственных нейронных сетях меньшего числа мемристоров влияние разброса их характеристик будет уменьшаться. Уменьшить количество мемристоров при аппаратной реализации искусственных нейронных сетей можно, например, путём использования сверточных сетей [218], систем разреженного кодирования [219] и резервуарных вычислительных систем [220]. Кроме того, ведётся разработка новых принципов обучения НВС. Среди таких можно отметить обучение спайковых НВС по биоподобным правилам типа пластичности, зависящей от времени (частоты) прихода импульсов (STDP (SRDP)) [221–224], нейрон-астроцитарные сети [225] и другие способы обучения [226]. Обучение синаптических связей в этом случае производится локально без необходимости их глобального (зависящего от состояний многих нейронов и весов сети) и точного изменения (как в случае с алгоритмом обратного распространения ошибки в формальных НВС, т.е. на базе традиционных (не спайковых) нейросетей). При этом при сопоставимом разбросе характеристик мемристоров спайковые НВС с обучением по правилу STDP могут демонстрировать даже большую точность классификации образов, чем достигается в формальных сетях НВС [76].

Весьма перспективным для робототехники и агентных интеллектуальных систем является также аппаратная реализация формальных и спайковых НВС в парадигме обучения с подкреплением, когда НВС в реальном времени обучается решению задачи методом проб и ошибок путём сравнения предсказанных значений некоторой формализующей задачи функции награды с реальным сигналом подкрепления от среды агента [110, 227, 228].

## 5. Заключение

Ожидается, что в ближайшие годы мемристорная технология если не заменит, то значительно расширит возможности КМОП-технологий в реализации нейроморфных вычислений и позволит эффективно обрабатывать большие объёмы данных в реальном масштабе времени. Характеристики мемристоров, такие как стохастичность, масштабируемость, интеграция, энергопотребление, быстродействие, стабильность и выносливость являются ключевыми для реализации нейроморфных вычислительных систем, функционирующих подобно работе мозга. Как следует из представленных данных, отдельные устройства продемонстрировали отличную эффективность в отношении определённых свойств, однако по совокупности характеристик прогресс пока не достигнут. Хотя мемристорная технология предлагает новые уникальные возможности для высокопроизводительных интеллектуальных вычислений, такие проблемы, как невозпроизводимость устройств и паразитные эффекты, все ещё в определённой степени ограничивают надёжную аппаратную реализацию нейронных сетей. В то же время, накоплен значительный массив экспериментальных данных, выявлены глубокие физические закономерности и определены конкретные технологические и архитектурные подходы для осуществления возможных прорывов в проблемах воспроизводимого синтеза и устойчивого функционирования надёжных цифро-аналоговых нейроморфных систем на базе мемристоров. Будущие исследования, в том числе в рамках приведенных в данной статье подходов и ряда других, могут помочь в среднесрочной перспективе решить эти проблемы. При этом изделия на основе мемристоров, безусловно, могут найти широкие практические применения.

**Благодарности.** Аналитический обзор современного состояния в разработке мемристоров и путей улучшения их функциональных характеристик выполнен в рамках госзадания МГУ имени М.В. Ломоносова в части оптимизации методом инженерии дефектов с помощью легирования, контроля вакансий кислорода для металлооксидных мемристоров и использования пористых структур. Анализ нейроморфных приложений мемристоров, а также особенностей резистивного переключения органических и неорганических мемристоров на основе нанокompозитов выполнен в основном по оригинальным результатам работы авторов при поддержке госзадания НИЦ "Курчатовский институт". Проведение обзора возможностей оптимизации характеристик мемристоров методами инженерии дефектов в части внедрения буферных слоёв и наночастиц, методом подбора электродов, при использовании многослойных мемристивных структур, обзора оптимизации характеристик прочих органических структур и применения технических реше-

ний внедрения мемристоров с сильно варьирующимися характеристиками выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант 23-19-00268), <https://rscf.ru/project/23-19-00268/>.

## Список литературы

1. Mead C *Proc. IEEE* **78** 1629 (1990)
2. Indiveri G et al. *Front. Neurosci.* **5** 73 (2011) DOI:10.3389/fnins.2011.00073
3. Furber S J. *Neural Eng.* **13** 051001 (2016)
4. Sheridan P, Lu W, in *Memristor Networks* (Eds A Adamatzky, L Chua) (Cham: Springer, 2014) p. 129, DOI:10.1007/978-3-319-02630-5\_8
5. Abbott L F, Regehr W G *Nature* **431** 796 (2004)
6. Zhou Z et al. *Nature Electron.* **3** 571 (2020)
7. Painkras E et al. *IEEE J. Solid-State Circuits* **48** 1943 (2013)
8. Akopyan F et al. *IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst.* **34** 1537 (2015)
9. Davies M et al. *IEEE Micro* **38** 82 (2018)
10. Coates A et al. "Deep learning with COTS HPC systems" *Proc. 30th Int. Conf. Machine Learning* **28** (3) 1337 (2013)
11. Merolla P A et al. *Science* **345** 668 (2014)
12. Moradi S et al. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* **12** 106 (2018)
13. Ramakrishnan S, Hasler P E, Gordon C *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* **5** 244 (2011)
14. Jouppi N P et al., in *ISCA'17. Proc. of the 44th Annual Intern. Symp. on Computer Architecture, Toronto, Canada, June 24–28, 2017* (New York: Association for Computing Machinery, 2017) p. 1, DOI:10.1145/3079856.3080246
15. Danial L et al. *Nature Electron.* **2** 596 (2019)
16. Zhang Y et al. *Appl. Phys. Rev.* **7** 011308 (2020)
17. Leiserson C E et al. *Science* **368** eaam9744 (2020)
18. Ielmini D, Wong H-S P *Nature Electron.* **1** 333 (2018)
19. Xia Q, Yang J J *Nature Mater.* **18** 309 (2019)
20. Borkar S, Chien A A *Commun. ACM* **54** 67 (2011)
21. Zhang X et al. *IEEE Electron Device Lett.* **39** 308 (2018)
22. Tang J et al. *Adv. Mater.* **31** 1902761 (2019)
23. Jin P et al. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs* **70** 3139 (2023)
24. Vongehr S, Meng X *Sci. Rep.* **5** 11657 (2015)
25. Wu Q et al. *Nanoscale* **10** 5875 (2018)
26. Yulyaevskikh G A et al. *Chaos Solitons Fractals* **190** 115784 (2025)
27. Ju S et al. *Appl. Surf. Sci.* **697** 162973 (2025)
28. Писарчик А Н, Храмов А Е *УФН* **193** 1298 (2023); Pisarchik A N, Hramov A E *Phys. Usp.* **66** 1224 (2023)
29. Nikiruy K E et al. *AIP Adv.* **9** 065116 (2019)
30. Rao M et al. *Nature* **615** 823 (2023)
31. Sharma D et al. *Nature* **633** 560 (2024)
32. Matsukatova A N et al. *Appl. Phys. Lett.* **117** 243501 (2020)
33. Govoreanu B et al., in *2011 Intern. Electron Devices Meeting, Washington, DC, USA, 05–07 December 2011* (Piscataway, NJ: IEEE, 2012) p. 31.6.1, DOI:10.1109/IEDM.2011.6131652
34. Prezioso M et al. *Nature* **521** 61 (2015)
35. Li C et al. *Nature Commun.* **9** 2385 (2018)
36. Chua L *IEEE Trans. Circuit Theory* **18** 507 (1971)
37. Chua L O, Kang S M *Proc. IEEE* **64** 209 (1976)
38. Strukov D B et al. *Nature* **453** 80 (2008)
39. Demin V A, Erokhin V V *Int. J. Unconvent. Comput.* **12** 433 (2016)
40. Abraham I *Sci. Rep.* **8** 10972 (2018)
41. Isah A, Bilbault J-M *J. Low Power Electron. Appl.* **12** (3) 44 (2022) DOI:10.3390/jlpeal2030044
42. Emelyanov A V et al. *AIP Adv.* **6** 111301 (2016)
43. Erokhin V *BioNanoSci.* **10** 834 (2020)
44. Lanza M et al. *Science* **376** eabj9979 (2022)
45. Yang J J et al. *Nature Nanotechnol.* **3** 429 (2008)
46. Yoon J-H et al. *Nature Commun.* **9** 417 (2018)
47. Indiveri G, Liu S-C *Proc. IEEE* **103** 1379 (2015)
48. Jiang H et al. *Nature Electron.* **1** 548 (2018)
49. Rai V K, Tripathy S, Mathew J *Procedia Comput. Sci.* **125** 576 (2018)
50. Mikhaylov A N et al. *Chaos Solitons Fractals* **144** 110723 (2021)
51. Surazhevsky I A et al. *Chaos Solitons Fractals* **146** 110890 (2021)

52. Qiang Z et al. *J. Semicond.* **34** 032001 (2013)
53. Lin M-H et al. *J. Appl. Phys.* **107** 124117 (2010)
54. Martyshov M N et al. *Phys. Rev. Applied* **14** 034016 (2020)
55. Matsukatova A N et al. *Nano Res.* **16** 3207 (2023)
56. Minnekhanov A et al. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** 54996 (2023)
57. Li X et al. *Nanotechnology* **35** 035703 (2023)
58. Yeon H et al. *Nature Nanotechnol.* **15** 574 (2020)
59. Parshina L et al. *Chaos Solitons Fractals* **161** 112384 (2022)
60. Швецов Б С и др. *Российские нанотехнологии* **16** 810 (2021); Shvetsov B S et al. *Nanotechnol. Rep.* **16** 777 (2021)
61. Panin G N *Chaos Solitons Fractals* **142** 110523 (2021)
62. Pazos S et al. *Nature Electron.* **7** 557 (2024)
63. Ambrogio S et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **63** 1508 (2016)
64. Мусорин А И и др. *УФН* **193** 1284 (2023); Musorin A I et al. *Phys. Usp.* **66** 1211 (2023)
65. Форш П А et al. *УФН* **194** 905 (2024); Forsh P A et al. *Phys. Usp.* **67** 855 (2024)
66. Pfeiffer P et al. *Sci. Rep.* **6** 29507 (2016)
67. Stremoukhov S et al. *Entropy* **25** 1134 (2023)
68. Стремюхов С Ю и др. *Письма в ЖЭТФ* **119** 343 (2024); Stremoukhov S Yu et al. *JETP Lett.* **119** 352 (2024)
69. Wang L et al. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **26** 4618 (2015)
70. Ielmini D *Microelectron. Eng.* **190** 44 (2018)
71. Yuan L et al. *Adv. Electron. Mater.* **7** 2100432 (2021)
72. Christensen D V et al. *Neuromorph. Comput. Eng.* **2** 022501 (2022)
73. Wang Z et al. *Nature Rev. Mater.* **5** 173 (2020)
74. Yang J J, Strukov D B, Stewart D R *Nature Nanotechnol.* **8** 13 (2013)
75. Chen J-Y et al. *Nano Lett.* **13** 3671 (2013)
76. Matsukatova A N et al. *Adv. Intell. Syst.* **5** 2200407 (2023)
77. Woo H C et al. *Adv. Electron. Mater.* **8** 2200656 (2022)
78. Prudnikov N V et al. *Phys. Status Solidi A* **220** 2200700 (2023)
79. Мапукатова А Н, Трофимов А Д, Емельянов А В *Письма в ЖЭТФ* **118** 355 (2023); Matsukatova A N, Trofimov A D, Emel'yanov A V *JETP Lett.* **118** 352 (2023)
80. Tian Q et al. *Appl. Phys. Lett.* **122** 153502 (2023)
81. Ryabova M A et al. *Nanoscale* **16** 20628 (2024)
82. Russo U et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **56** 186 (2009)
83. Lee H D, Magyari-Köpe B, Nishi Y *Phys. Rev. B* **81** 193202 (2010)
84. Ielmini D, Bruchhaus R, Waser R *Phase Transit.* **84** 570 (2011)
85. Lanza M et al. *Adv. Electron. Mater.* **5** 1800143 (2019)
86. Sawa A *Mater. Today* **11** (6) 28 (2008)
87. Prudnikov N V et al. *Nanotechnology* **35** 335204 (2024)
88. Lapkin D A et al. *Adv. Electron. Mater.* **6** 2000511 (2020)
89. Valov I, Kozicki M N *J. Phys. D* **46** 074005 (2013)
90. Lübben M, Valov I *Adv. Electron. Mater.* **5** 1800933 (2019)
91. Minnekhanov A A et al. *Organic Electron.* **74** 89 (2019)
92. Веденеев А С и др. *Письма в ЖЭТФ* **106** 387 (2017); Vedeneev A S et al. *JETP Lett.* **106** 411 (2017)
93. Sebastian A, Le Gallo M, Eleftheriou E *J. Phys. D* **52** 443002 (2019)
94. Yamada N et al. *J. Appl. Phys.* **69** 2849 (1991)
95. Fong S W, Neumann C M, Wong H-S P *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 4374 (2017)
96. Ielmini D et al. *IEEE Electron Device Lett.* **25** 507 (2004)
97. Xu X et al. *Nature* **589** 44 (2021)
98. Kiselev A V et al. *J. Russ. Laser Res.* **45** 388 (2024)
99. Gruverman A et al. *Nano Lett.* **9** 3539 (2009)
100. Slesazek S, Mikolajick T *Nanotechnology* **30** 352003 (2019)
101. Andreeva N V et al. *Adv. Electron. Mater.* **10** 2300806 (2024)
102. Chouprik A et al. *Nanomaterials* **13** 3063 (2023)
103. Takashima D et al. *IEEE J. Solid-State Circuits* **36** 1713 (2001)
104. Böске T S et al. *Appl. Phys. Lett.* **99** 102903 (2011)
105. Lee J et al. *J. Alloys Compd.* **990** 174371 (2024)
106. Wu J et al. *Nature Electron.* **3** 466 (2020)
107. Wang X, Wang J *Nature Electron.* **3** 440 (2020)
108. Parkin S S P et al. *Nature Mater.* **3** 862 (2004)
109. Slaughter J M *Annu. Rev. Mater. Res.* **39** 277 (2009)
110. Wang Z et al. *Nature Electron.* **2** 115 (2019)
111. Kim Y-B et al., in *2011 Symp. on VLSI Technology, 14–16 June 2011, Kyoto, Japan. Digest of Technical Papers* (Piscataway, NJ: IEEE, 2011) p. 52
112. Papandreou N et al., in *2011 IEEE Intern. Symp. of Circuits and Systems, ISCAS, 15–18 May 2011, Rio de Janeiro, Brazil* (Piscataway, NJ: IEEE, 2011) p. 329, DOI:10.1109/ISCAS.2011.5937569
113. Shiokawa Y et al. *AIP Adv.* **9** 035236 (2019)
114. Yuklyayevskikh G A et al. *BioNanoSci.* **15** 405 (2025)
115. Vourkas I et al., in *2017 IEEE 8th Latin American Symp. on Circuits, LASCAS, 20–23 February 2017, Bariloche, Argentina* (Piscataway, NJ: IEEE, 2017) p. 1, DOI:10.1109/LASCAS.2017.7948043
116. Kim K M et al. *Sci. Rep.* **6** 20085 (2016)
117. Alibart F et al. *Nanotechnology* **23** 075201 (2012)
118. Никируй К Э и др. *Письма в ЖТФ* **44** (10) 20 (2018); Nikiruy K E et al. *Tech. Phys. Lett.* **44** 416 (2018)
119. Jiang H et al. *Sci. Rep.* **6** 28525 (2016)
120. Wong H-S P et al. *Proc. IEEE* **98** 2201 (2010)
121. Navarro G et al., in *2013 IEEE Intern. Electron Devices Meeting, 9–11 December 2013, Washington, DC, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 2013) p. 21.5, DOI:10.1109/IEDM.2013.6724678
122. Valov I et al. *Nanotechnology* **22** 289502 (2011)
123. Mohammad B et al. *Nanotechnol. Rev.* **5** 311 (2016) DOI:10.1515/ntrev-2015-0029
124. Jiang H, Li C, Xia Q *Jpn. J. Appl. Phys.* **61** SM0802 (2022) DOI:10.35848/1347-4065/ac665d
125. Lanza M et al. *ACS Nano* **15** 17214 (2021)
126. Chen B et al., in *2011 Intern. Electron Devices Meeting, 05–07 December 2011, Washington, DC, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 2011) p. 12.3, DOI:10.1109/IEDM.2011.6131539
127. Padilla A et al. *J. Appl. Phys.* **110** 054501 (2011)
128. Raoux S et al. *Microelectron. Eng.* **85** 2330 (2008)
129. Lee M-J et al. *Nature Mater.* **10** 625 (2011)
130. Kim I S et al., in *2010 Symp. on VLSI Technology, 15–17 June 2010, Honolulu, HI, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 2010) p. 203, DOI:10.1109/VLSIT.2010.5556228
131. Boyn S et al. *Appl. Phys. Lett.* **104** 052909 (2014)
132. Chanthbouala A et al. *Nature Nanotechnol.* **7** 101 (2012)
133. Strachan J P et al. *Nanotechnology* **22** 505402 (2011)
134. Xiong F et al. *Science* **332** 568 (2011)
135. Grezes C et al. *Appl. Phys. Lett.* **108** 012403 (2016)
136. Choi B J et al. *Adv. Funct. Mater.* **26** 5290 (2016)
137. Rao F et al. *Science* **358** 1423 (2017)
138. Zhao H et al. *J. Phys. D* **45** 025001 (2012)
139. Pi S et al. *Nature Nanotechnol.* **14** 35 (2019)
140. Golonzka O et al., in *2019 Symp. on VLSI Technology, 9–14 June 2019, Kyoto, Japan* (Piscataway, NJ: IEEE, 2019) p. T230, DOI:10.23919/VLSIT.2019.8776570
141. Liang J et al., in *2011 Symp. on VLSI Technolog. Digest of Technical Papers, 14–16 June 2011, Kyoto, Japan* (Piscataway, NJ: IEEE, 2011) p. 100
142. Lee K et al., in *2018 IEEE Intern. Electron Devices Meeting, IEDM, 1–5 December 2018, San Francisco, CA, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 2018) p. 27.1.1, DOI:10.1109/IEDM.2018.8614566
143. Song Y J et al., in *2018 IEEE Intern. Electron Devices Meeting, IEDM, 1–5 December 2018, San Francisco, CA, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 2018) p. 18.2.1, DOI:10.1109/IEDM.2018.8614635
144. Park C et al., in *2018 IEEE Symp. on VLSI Technology, 18–22 June 2018, Honolulu, HI, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 2018) p. 185, DOI:10.1109/VLSIT.2018.8510653
145. Gao X S et al. *Appl. Phys. Lett.* **101** 142905 (2012)
146. Luo Q et al., in *2017 IEEE Intern. Electron Devices Meeting, IEDM, 2–6 December 2017, San Francisco, CA, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 2017) p. 2.7.1, DOI:10.1109/IEDM.2017.8268315
147. Yoon K J, Kim Y, Hwang C S *Adv. Electron. Mater.* **5** 1800914 (2019)
148. Choi Y et al., in *2012 IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf., 19–23 February 2012, San Francisco, CA, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 2012) p. 46, DOI:10.1109/ISSCC.2012.6176872
149. Михайлов А Н и др. *Нейротехнологии и нейроэлектроника* **1** (1) 44 (2024)
150. Szot K et al. *Nature Mater.* **5** 312 (2006)
151. Choi S et al. *Nature Mater.* **17** 335 (2018)
152. Li S-S, Su Y-K *RSC Adv.* **9** 2941 (2019)
153. Zhao L et al. *Appl. Phys. Lett.* **102** 083506 (2013)
154. Sedghi N et al. *Appl. Phys. Lett.* **110** 102902 (2017)
155. Dahl S G, Ivans R, Cantley K D, in *ICONS '18: Proc. of the Intern. Conf. on Neuromorphic Systems, July 23–26, 2018, Knoxville, TN, USA* (New York: Association for Computing Machinery, 2018) p. 1, DOI:10.1145/3229884.3229885

156. Ilin A S et al. *Appl. Phys. Lett.* **126** 143508 (2025)  
 157. Zeng T et al. *Small* **17** 2006662 (2021)  
 158. Ahn M et al. *Adv. Electron. Mater.* **7** 2001258 (2021)  
 159. Lin C-Y et al. *IEEE Electron Device Lett.* **29** 1108 (2008)  
 160. Wang Y et al. *Nanotechnology* **21** 045202 (2010)  
 161. Lim S et al. *IEEE Electron Device Lett.* **39** 312 (2018)  
 162. Швецов Б С и др. *Письма в ЖТФ* **45** (21) 40 (2019); Shvetsov B S et al. *Tech. Phys. Lett.* **45** 1103 (2019)  
 163. Yoon J H et al. *APL Mater.* **11** 090701 (2023)  
 164. Li L et al. *Nanoscale* **12** 3267 (2020)  
 165. Yang J J et al. *Adv. Mater.* **22** 4034 (2010)  
 166. Андреева Н В и др. *Российские нанотехнологии* **16** 825 (2021); Andreeva N V et al. *Nanotechnol. Russia* **16** 790 (2021)  
 167. Zhong S, Duan S, Cui Y *RSC Adv.* **4** 40924 (2014)  
 168. Филатов Д О и др. *ФТП* **55** 754 (2021); Filatov D O et al. *Semiconductors* **55** 731 (2021)  
 169. Li C et al. *J. Appl. Phys.* **116** 114501 (2014)  
 170. Мацукатова А Н и др. *Письма в ЖТФ* **46** (2) 25 (2020); Matsukatova A N et al. *Tech. Phys. Lett.* **46** 73 (2020)  
 171. Рылков В В и др. *ЖЭТФ* **158** 164 (2020); Rylkov V V et al. *J. Exp. Theor. Phys.* **131** 160 (2020)  
 172. Iliasov A I et al. *Nanoscale Horiz.* **9** 238 (2024)  
 173. Chen L et al. *IEEE Electron Device Lett.* **32** 794 (2011)  
 174. Liu Q et al. *ACS Nano* **4** 6162 (2010)  
 175. Uenuma M et al. *Nanotechnology* **22** 215201 (2011)  
 176. Banerjee W et al. *J. Appl. Phys.* **110** 074309 (2011)  
 177. Wang D-T et al. *IEEE Electron Device Lett.* **37** 878 (2016)  
 178. Banerjee W, Maikap S, in *Proc. of Technical Program of 2012 VLSI Technology, System and Application, 23–25 April 2012, Hsinchu, Taiwan* (Piscataway, NJ: IEEE, 2012) p. 1, DOI:10.1109/VLSI-TSA.2012.6210126  
 179. Fang Z et al. *IEEE Electron Device Lett.* **32** 566 (2011)  
 180. Jiang Y et al. *Mater. Sci. Semicond. Process.* **136** 106131 (2021)  
 181. Isaev A G, Permyakova O O, Rogozhin A E *Thin Solid Films* **781** 139993 (2023)  
 182. Park J et al. *Chaos Solitons Fractals* **191** 115910 (2025)  
 183. Pan C et al. *2D Mater.* **4** 025099 (2017)  
 184. Kormath Madam Raghupathy R et al. *Adv. Theory Simul.* **2** 1900036 (2019)  
 185. Pan C et al. *Adv. Funct. Mater.* **27** 1604811 (2017)  
 186. Joksas D et al. *Adv. Intell. Syst.* **4** 2200068 (2022)  
 187. Novoselov K S et al. *Science* **353** aac9439 (2016)  
 188. Sanchez Esqueda I, Zhao H, Wang H *J. Appl. Phys.* **124** 152133 (2018)  
 189. Yeon C et al. *Small* **14** 1702747 (2018)  
 190. Luo S et al. *Nanoscale* **13** 6654 (2021)  
 191. Sangwan V K et al. *Nature Nanotechnol.* **10** 403 (2015)  
 192. Krishnaprasad A et al. *ACS Nano* **16** 2866 (2022)  
 193. Wang Y et al. *Small* **15** 1805431 (2019)  
 194. Liu P et al. *Appl. Phys. Lett.* **121** 233501 (2022)  
 195. Bala A et al. *ACS Nano* **17** 4296 (2023)  
 196. Mu B et al. *J. Mater. Chem. C* **8** 12714 (2020)  
 197. Gao S et al. *Chem. Soc. Rev.* **48** 1531 (2019)  
 198. Park H-L, Lee T-W *Organic Electron.* **98** 106301 (2021)  
 199. Odintsov D S et al. *ChemPhysChem.* **25** e202400266 (2024)  
 200. Lee Y et al. *Joule* **5** 794 (2021)  
 201. van de Burgt Y, Gkoupidenis P *MRS Bull.* **45** 631 (2020)  
 202. Matsukatova A N et al. *Organic Electron.* **102** 106455 (2022)  
 203. Trofimov A D et al. *Nanoscale* **17** 8484 (2025)  
 204. Zhu X, Lee J, Lu W D *Adv. Mater.* **29** 1700527 (2017)  
 205. Yoo E J et al. *Adv. Mater.* **27** 6170 (2015)  
 206. Chen Q et al. *Adv. Electron. Mater.* **5** 1800852 (2019)  
 207. Shi Y et al. *Nature Commun.* **9** 5312 (2018)  
 208. Wang C-H et al., in *2018 IEEE Intern. Electron Devices Meeting, IEDM, 1–5 December 2018, San Francisco, CA, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 2018) p. 22.5.1, DOI:10.1109/IEDM.2018.8614495  
 209. Pedretti G et al. *Sci. Rep.* **7** 5288 (2017)  
 210. Lastras-Montañó M A, Cheng K-T *Nature Electron.* **1** 466 (2018)  
 211. Yousefi A, Eslami N, Moaiyeri M H *IEEE Access* **10** 105040 (2022)  
 212. Zhang L et al. *IEEE Electron Device Lett.* **35** 199 (2014)  
 213. Aluguri R, Tseng T-Y *IEEE J. Electron Devices Soc.* **4** 294 (2016)  
 214. Chen H-Y et al. *J. Electroceramics* **39** 21 (2017)  
 215. Tang J et al., in *2018 IEEE Intern. Electron Devices Meeting, IEDM, 1–5 December 2018, San Francisco, CA, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 2018) p. 13.1.1, DOI:10.1109/IEDM.2018.8614551  
 216. Fuller E J et al. *Adv. Mater.* **29** 1604310 (2017)  
 217. van de Burgt Y et al. *Nature Mater.* **16** 414 (2017)  
 218. Matsukatova A N et al. *Nanomaterials* **12** 3455 (2022)  
 219. Sheridan P M et al. *Nature Nanotechnol.* **12** 784 (2017)  
 220. Du C et al. *Nature Commun.* **8** 2204 (2017)  
 221. Wang Z et al. *Nature Commun.* **11** 1510 (2020)  
 222. Ильясов А И и др. *Письма в ЖТФ* **47** (13) 3 (2021); Ilyasov A I et al. *Tech. Phys. Lett.* **47** 656 (2021)  
 223. Demin V A et al. *Neural Networks* **134** 64 (2021)  
 224. Никируй К Э и др. *Российские нанотехнологии* **16** 761 (2021); Nikiruy K E et al. *Nanotechnol. Russia* **16** 732 (2021)  
 225. Stasenko S V et al. *Chaos Solitons Fractals* **181** 114648 (2024)  
 226. Масленников О В др. *УФН* **192** 1089 (2022); Maslennikov O V et al. *Phys. Usp.* **65** 1020 (2022)  
 227. Vlasov D et al. *Neural Networks* **166** 512 (2023)  
 228. Ji X et al. *AIP Conf. Proc.* **2073** 020094 (2019)

## Memristors for neuromorphic computing systems: basic parameters and methods of their optimization

A.S. Ilin<sup>(1,a)</sup>, A.N. Matsukatova<sup>(1,2,b)</sup>, M.N. Martyshev<sup>(1,c)</sup>, A.V. Emelyanov<sup>(1,2,3,d)</sup>, V.V. Rylkov<sup>(2,e)</sup>, V.A. Demin<sup>(1,2,f)</sup>, P.A. Forsh<sup>(1,g)</sup>, P.K. Kashkarov<sup>(1,2,3,h)</sup>, M.V. Kovalchuk<sup>(1,2,3,i)</sup>

<sup>(1)</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Leninskie gory 1, str. 2, 119991 Moscow, Russian Federation

<sup>(2)</sup> National Research Center 'Kurchatov Institute', pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russian Federation

<sup>(3)</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),

Institutskii per. 9, 141701 Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation

E-mail: <sup>(a)</sup> ilinas@my.msu.ru, <sup>(b)</sup> an.matsukatova@physics.msu.ru, <sup>(c)</sup> mmartyshev@mail.ru, <sup>(d)</sup> emelyanov.andrey@mail.ru,

<sup>(e)</sup> vvrylkov@mail.ru, <sup>(f)</sup> demin.vyacheslav@mail.ru, <sup>(g)</sup> phorsh@mail.ru, <sup>(h)</sup> p.kashkarov@mail.ru, <sup>(i)</sup> koval@nrcki.ru

In recent years, the scientific community has maintained substantial interest in neuromorphic computing systems based on memristive devices owing to their unique advantages. Although there is a wide variety of memristors, a device with optimal parameters for neuromorphic computing has not been developed yet. This article presents comprehensive overview of the principal types and parameters of memristive devices. Memristors operating through valence change, electrochemical metallization, phase change, ferroelectric tunneling, and spin-tunneling effects are considered. The key characteristics, benefits and limitations of each memristor type are analyzed. The main approaches to enhancing parameters of memristors are presented, including optimization of composition and structure of memristive devices, circuit architecture and algorithmic solutions.

**Keywords:** memristors, mechanisms of operation, type of memristors, characteristic optimization

PACS numbers: 07.05.Mh, 87.18.Sn, 87.19.L–

Bibliography — 228 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **196** (4) 369–382 (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2025.09.040037>

Received 14 July 2025, revised 19 September 2025

*Physics – Uspekhi* **69** (4) (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2025.09.040037>