

Мемристор – основной элемент будущего искусственного интеллекта. Типы и основные характеристики (Обзор)

А. Юсупов, Х. Ш. Сапаров, А. Э. Атамуратов

В обзорной статье рассматривается мемристор как один из основных элементов нейроморфного вычисления, в частности будущего искусственного интеллекта. Рассмотрена архитектура кроссбарного включения мемристора в искусственную нейронную сеть. Описываются величины, которыми характеризуются основные свойства мемристоров всех типов. Анализируются мемристоры на основе различных активных слоев. Особое внимание уделяется мемристорам на основе двумерных материалов планарной и вертикальной архитектуры. Обсуждаются физические механизмы резистивного переключения, на которых основаны принципы работы мемристоров. В конце статьи перечисляются основные достоинства и недостатки по сравнению с существующими элементами памяти, используемыми в классических компьютерах.

Ключевые слова: мемристоры, нейроморфное вычисление, искусственный интеллект, резистивное переключение, филамент, халькогениды переходных металлов, твердый электролит, оксиды металлов, синапс, нейрон.

Ссылка: Юсупов А., Сапаров Х. Ш., Атамуратов А. Э. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 4. С. 292.

Reference: A. Yusupov, H. Sh. Saparov, and A. E. Atamuratov, Usp. Prikl. Fiz. **8** (4), 292 (2020).

Введение

Одним из приоритетных направлений электроники в настоящее время является создание искусственного интеллекта. Функция искусственного интеллекта отличается от вычислительных функций, имеющих в настоящее время, компьютеров. Искусственный интеллект подразумевает предсказания, выводы и интуицию, а не просто вычисления. Но до-

стигнутые самые креативные обучающие алгоритмы, направленные на выполнение этих функций, ограничены возможностями аппаратного обеспечения. Поэтому, чтобы добиться значительных успехов в создании искусственного интеллекта сама архитектура аппаратного обеспечения должна подвергнуться существенному пересмотру. Аппаратное обеспечение действующего компьютера непрерывно масштабируется, его размеры достигают своих физических пределов и далее уже не могут обеспечивать высокое совершенство при умеренных затратах. Проблемы архитектуры классического компьютера возникают из-за узости памяти, энергозависимости и ограниченности быстродействия, связанной с постоянным перемещением данных между памятью и процессором, часто называемой «бутылочным горлом фон Неймана». В большинстве случаев решение такой проблемы могут обеспечить мемристоры, как память с ультравысокой плотностью, которая

Юсупов Ахмед^{1,2}, проф., д.ф.-м.н.

Сапаров Хушнуд Абдушарипович², ассистент преп.

Атамуратов Атабек Эгамбердиевич², доц., д.ф.-м.н.

¹Ташкентский университет информационных технологий. Узбекистан, 100200, г. Ташкент, ул. А. Темура, 108.

E-mail: ayus@mail.ru

²Ургенчский государственный университет.

Узбекистан, 220100, г. Ургенч, ул. Х. Олиджана, 14.

E-mail: xushnudbeksaparov@gmail.com; ata-

bek.atamuratov@urdu.uz

Статья поступила в редакцию 05 августа 2020 г.

© Юсупов А., Сапаров Х. А., Атамуратов А. Э., 2020

может прямо интегрироваться в процессорный чип, и таким образом, существенно уменьшая эффект «бутылочного горла фон Неймана» и улучшая энергетическую эффективность и быстродействие системы.

Предполагаемые в настоящее время принципы искусственного интеллекта основаны на принципах функционирования человеческого мозга, то есть на использовании сети нейронов. Однако в основном это делается эмуляцией функций нейронов через использование алгоритмов машинного обучения или параллельной обработки. Но среди научного сообщества прорабатывается вопрос: «нельзя ли сделать так, чтобы вместо выполнения эмуляций компьютер сам функционировал как мозг?». Начиная с 1970-х годов, исследователи предложили создать вычислительные устройства с архитектурой мозга, при этом сам такой подход принято называть нейроморфным вычислением. Нейроморфные чипы имеют потенциал, чтобы продвинуть машинный интеллект на совершенно новый уровень. Примечательным является то, что мемристоры играют роль большую, чем просто память или сохранение данных. Их способность совмещать как хранение данных, так и вычисление в одном элементе идеально подходит для реализации биоинспирированных нейронных сетей в аппаратном обеспечении. Искусственные нейронные сети показывают превосходство их функционирования над классическими системами при обработке когнитивных задач и обработке массива данных.

Нейронная сеть в её простейшей форме является группой нейронов соединенных синаптическими связями с определенным весом. Каждый синапс передаёт информацию из пресинаптического нейрона в постсинаптический нейрон, изменяя её в соответствии с весом синапса. Обычно для выполнения конкретных задач сеть обучается посредством обновления веса синапса. До настоящего времени имплементация нейронных сетей в основном основывалась на аппаратном обеспечении обычных компьютеров, где веса синапса сохранялись в отдельной памяти и была необходимость постоянно загружать его в устройство обработки для подачи вычисленных данных в следующий нейрон. Как результат этого, совершенство системы все еще ограничивается эффек-

том «бутылочного горла фон Неймана» и требует огромные аппаратные вычислительные ресурсы и большие затраты энергии в течении каждой обработки. В противоположность этому при имплементации нейронной сети, основанной на мемристоре (искусственном синапсе), единое устройство может одновременно сохранять синаптический вес и модулировать передаваемый сигнал (рис. 1) [1,2]. В этом случае переданный сигнал (ток протекающий в постсинаптический нейрон) определяется как продукт от входного сигнала (импульс напряжения от пресинаптического нейрона) и веса синапса (проводимость мемристора), определяемый через обычный закон Ома. Естественное совмещение памяти и вычисления в едином мемристорном приборе устраняет перемещение данных, и таким образом может существенно улучшить эффективность системы.

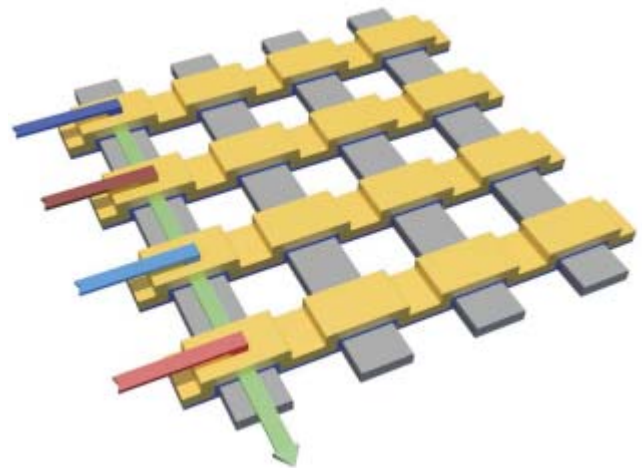


Рис. 1. Схема применения искусственной нейронной сети в виде мемристорных кроссбаров. В каждом перекрестке кроссбара формируется мемристор и он может использоваться одновременно как для сохранения данных так и для обработки информации. В этом приближении умножение вектор-матрица может быть получено через обычные законы Ома и Кирхгофа простой операцией чтения.

К настоящему времени выявлен ряд материалов имеющих свойство энергонезависимого переключения сопротивления, позволяющего использовать их в мемристорах в качестве основного рабочего материала [3, 4]. Сравнительно недавно эффект резистивного энергонезависимого переключения был также обнаружен и в многослойных структурах на основе двумерных материалов [5–8]. Предпо-

лагалось, что эффект резистивного переключения не возможен в двумерных однослойных приборах из-за наличия чрезмерного тока утечки [5, 9]. Только после того, как в однослойных планарных 2D мемристорах особым подходом был достигнут эффект переключения сопротивления [10] еще больше усилился интерес к мемристорам на основе 2D материалов. Так, в работе [11] впервые показан устойчивый эффект переключения в вертикальных многослойных 2D приборах, а в работе [12] уже показан эффект резистивного переключения в монослойном вертикальном 2D мемристоре. Поэтому в данной работе, в отличие от предыдущих обзорных работ, мемристоры систематизируются по типу рабочего материала и при этом особое внимание уделяется мемристорам на основе двумерных материалов. В данном обзоре также рассматривается общепринятая структура мемристора и общие характеристики и параметры, требуемые для оценки качества любого типа мемристоров.

Во многих обзорных работах рассматриваются и анализируются механизмы энергонезависимого резистивного переключения в связи с конкретным мемристором [13–15]. Но, часто, для читателя впервые знакомящегося с работой мемристора, удобней иметь представление о возможных механизмах резистивного переключения независимо от типа мемристора. Поэтому в данной работе также проводится отдельный анализ таких основных физических механизмов как изменение фазового состояния и филаментарный механизм, часто наблюдаемых в мемристорах, ответственных за энергонезависимое резистивное переключение. Оцениваются достоинства и проблемы для интеграции мемристоров в нейроморфное вычисление. В конце статьи приведено краткое заключение.

Мемристор. Характеристики и параметры

Мемристоры представляют собой энергонезависимые двухполюсные запоминающие устройства, основанные на переключении сопротивления [16]. Сопротивление мемристора зависит от прошедшего через него заряда и после отключения напряжения в цепи он «запоминает» последнее значение сопротивления. Поэтому его называли мемристором –

резистором с памятью (Memristor – memory resistor).

В последние годы появились технологии энергонезависимой памяти, которые при использовании в мемристорах могут одновременно обеспечивать как память, так и логические функции [17–20]. К таким технологиям относятся технология памяти с изменением фазового состояния [21], технология резистивной памяти с произвольным доступом (RRAM) [22–25] и технология памяти с использованием переноса спинового момента с произвольным доступом (STT-RAM) [26]. Хотя мемристоры могут быть изготовлены по различным технологиям и на основе различных материалов, для выполнения своего предназначения требования к их характеристикам и параметрам являются общими. Рассмотрим более подробно эти характеристики, параметры и требования к ним [3].

Размеры прибора. Высокомасштабная интеграция нейронных сетей требует использование компактных синаптических приборов с малыми размерами. Резистивные синаптические приборы с размерами меньше 10 нм являются наиболее предпочитаемыми. Имеющиеся в настоящее время RRAM устройства и устройства памяти, основанные на изменении фазового состояния (phase change memory (PCM)), уже достигли таких размеров и большинство из них пока предназначены для цифрового приложения.

Пластичность. Под пластичностью понимается возможность задания резистивного состояния мемристивного элемента. Пластичность, наблюдаемая в биологических синапсах, показывает поведение подобное аналоговому сигналу в синапсах с многоуровневыми весовыми состояниями. Большинство нейронинспирированных алгоритмов также применяют аналоговые синаптические веса для обучения или установления особенных характеристик. Большие многоуровневые состояния (больше чем сто уровней) в основном способствуют лучшей способности обучения и улучшению устойчивости сети.

Динамический диапазон. Динамический диапазон представляет собой отношение on/off максимальной проводимости к минимальной проводимости активного слоя. Большой динамический диапазон способствует

лучшей способности картографирования весовых состояний прибора.

Асимметрия и линейность обновления весов. Под линейностью обновления весов подразумевается линейная зависимость проводимости прибора от числа идентичных программирующих импульсов. Асимметрия обновления весов означает, что в реальных ситуациях кривая изменения проводимости при увеличении проводимости отличается от кривой изменения проводимости при уменьшении проводимости. Рисунок 2, а показывает пример изменения проводимости под действием идентичных импульсов в приборе на основе $\text{TaO}_x/\text{TiO}_2$ [27, 28]. Такая нелинейность и асимметрия являются нежелательными, так как изменение веса (ΔW) зависит от текущего веса (W), или другими словами обновление веса зависит от предыстории.

Энергия потребления при программировании. Оценки показывают, что в биологических синапсах энергия, потребляемая на одно синаптическое событие, составляет порядка 1–10 fJ. В большинстве RRAM приборов энергия программирования составляет порядка 100 fJ – 10 pJ, в то время как в PCM приборах эта энергия может достигать даже 100 pJ [3]. Фундаментальной причиной отличия потребляемой энергии в этих случаях является то, что движение ионов/дефектов в твердотельных приборах намного трудней, чем движение ионов кальция в жидкой среде в биологических синапсах. Грубыми оценками можно показать, что в биологическом синапсе импульс напряжения имеет амплитуду ~ 10 mV, ионный ток составляет ~ 1 nA, и длительность импульса ~ 1 ms, следовательно, энергия будет равна примерно 10 fJ. В резистивном синаптическом приборе типичное программируемое напряжение составляет ~ 1 V, а типичный программирующий ток равен ~ 10 μ A. Даже при скорости программирования ~ 100 ns, потребляемая энергии будет порядка pJ. Следовательно, уменьшения потребляемой энергии можно добиться улучшением скорости программирования, уменьшив её до порядка \sim ns [3].

Время хранения и стойкость. Во время обучения вес мемристора часто обновляется и время хранения данных может уменьшиться. После завершения обучения резистивные си-

наптические приборы должны вести себя как память с продолжительным сроком хранения, с долготой хранения порядка 10 лет при максимальной рабочей температуре чипа (т. е. 85 °C). Стойкость к количеству циклов сильно зависит от применения и от того как много обновлений веса требуется в процессе обучения.

Однородность и изменчивость. Плохая однородность или существенная изменчивость в энергонезависимых элементах памяти является большой проблемой при их применении в цифровых схемах. Напротив нейронные сети показывают потенциальную ошибкоустойчивость к изменчивостям параметров прибора. Изменчивости прибора могут быть допустимыми и существенно не влиять на его работу в частности из-за двух механизмов: наличие массива связей между нейронными узлами в синаптическом ряду и итеративных процессов обновления веса во время онлайн обучения. Допустимая степень изменчивости на системном уровне строго зависит от архитектуры сети и точности требуемой конкретным приложением. Недавние результаты показали разумную ошибкоустойчивость от изменчивостей прибора в различных нейронных сетях [27, 29]. Однако при офлайн обучении требования к однородности являются более строгими.

Мемристоры на основе различных активных слоев

Способность обратимо изменять проводимость промежуточного слоя под каким-либо воздействием является основной особенностью мемристоров. Характер изменения проводимости зависит как от материала промежуточного слоя, так и от воздействия приводящего к изменению проводимости. В зависимости от материала и внешнего воздействия наблюдаются различные физические механизмы, вызывающие изменения проводимости. В качестве основного промежуточного материала, в основном, используются оксиды металлов, дихалькогениды переходных металлов, твердые электролиты. Подробный обзор мемристоров на их основе приведен в работе [15]. Мы кратко рассмотрим особенности мемристоров как на основе этих материалов, так и более подробно остановимся на мемристорах на основе двухмерных материалов.

Мемристоры на основе оксидов металлов. Одним из часто используемых активных слоев между металлическими электродами мемристоров являются оксиды металлов. Наиболее перспективными для применения в мемристорах на данный момент оксидами металлов являются стабилизированные иттрием диоксид циркония и диоксид гафния, оксид титана [30]. Переход активного оксидного слоя из состояния с низкой проводимостью в состояние с высокой проводимостью, и наоборот, осуществляется посредством формирования каналов проводимости и управления параметрами этого канала. Параметры канала проводимости определяются материалом оксидного слоя, материалами электрода и напряжением, прикладываемым к электродам. Проводимость канала может быть как биполярной (проводимость активного слоя меняется при изменении полярности прикладываемого напряжения), так и униполярной (проводимость активного слоя меняется при одной полярности напряжения).

Одной из важных характеристик мемристоров является устойчивость параметров к деградации при увеличении циклов переключения. Мемристоры на основе оксидов металлов имеют высокую устойчивость к циклической деградации. Самые распространенные оксиды металлов выдерживали не менее 10^5 циклов перезаписи [31–33]. Значения сопротивлений для состояний SET и RESET сохраняются не менее 10^4 с при комнатной температуре [31, 33]. Отношение сопротивлений в двух состояниях для основных оксидов металлов составляет не менее 2–3 порядков [32, 34, 35].

Мемристорные структуры на основе оксидов металлов совместимы с современными КМОП-технологиями в объеме кремния, а также КНИ-технологией. Основным недостатком таких структур – потеря электрофизических свойств в процессе многократных переключений, а также самопроизвольная диффузия, сопровождаемая изменением состояния элемента.

Мемристоры на основе халькогенидов переходных металлов. Халькогениды, являющиеся бинарным химическим соединением халькогенов с металлами, характеризуются сильной зависимостью сопротивления мате-

риала от его фазового состояния. Это свойство позволяет использовать их для изготовления ячеек памяти. В среднем отношение значений сопротивления в высокоомном и низкоомном состояниях составляет не менее двух порядков [36–38]. Для типичного халькогенида $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) максимальное сопротивление, присущее материалу в аморфном состоянии, составляет около 1 МОм, а минимальное около 1 кОм [37].

Для перевода халькогенидного сплава из аморфного в кристаллическое состояние прикладывается напряжение большее определенного порогового. При таких напряжениях через сплав проходит ток достаточный для достижения температуры кристаллизации. В результате кристаллизации халькогенид переходит в низкоомное состояние. Для обратного перехода в высокоомное состояние подается короткий импульс тока с высокой амплитудой, достаточной для достижения температуры плавления и перехода обратно в аморфное состояние. В высокоомное состояние халькогенид переходит в течение нескольких наносекунд [36, 38].

Одним из основных преимуществ мемристоров на основе халькогенидов является достаточно большое число циклов перезаписи (от 10^9 до 10^{13}), и при этом температурная стабильность является хорошей (заданные значения сопротивления сохраняются на протяжении 10 лет при температурах до 110°C) [39].

Халькогениды состоят из одного или нескольких элементов VI группы Периодической системы химических элементов. В литературе представлены различные по составу халькогенидные сплавы, такие как GST [38–42], GeTe [39], легированные серебром или индием, сплав сурьмы и теллура [43] и др. [44]. Наиболее используемыми в настоящее время сплавами являются $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и GeTe, благодаря их высокой скорости кристаллизации [37]. Кристаллизация является наиболее длительным процессом и время кристаллизации представляет собой одну из важнейших характеристик, которая определяет максимальную скорость переключения элементов.

Мемристоры на основе твердых электролитов. Мемристоры на основе твердых электролитов состоят из твердого электроли-

та, как активного элемента, помещенного между двумя металлическими электродами. В качестве твердого электролита может служить сульфид германия Ge_xS_y [45, 46], селенид германия Ge_xSe_y [47–49], сульфид мышьяка As_2S_3 [35, 50] и сульфида меди Cu_2S [35, 51]. Один из электродов является химически активным материалом (например, серебро [45] или медь [33]), а второй инертным металлом (например, платина [32, 35, 46, 52, 53], вольфрам [45, 54], золото [50]). Низкоомное состояние электролита устанавливается формированием проводящей нити в электролите между электродами. Высокоомное состояние соответствует состоянию отсутствия проводящей нити. Проводящая нить между двумя электродами формируется за счет диффузии ионов электрода [49, 51, 52, 55, 56]. В начальный момент, при отсутствии проводящей нити, состояние электролита высокоомное (RESET) (рис. 2, [45], участок А). При приложении положительного напряжения к электрохимически активному электроду на его поверхности происходит образование ионов, которые под действием поля дрейфуют через электролит к другому инертному электроду (рис. 2, [45], участок В). Когда ионы достигают инертного электрода происходит восстановление ионов, которые кристаллизуются на поверхности электрода (рис. 2, [45], участок С). Со временем происходит рост кристаллической проводящей нити до достижения активного электрода, приводящего к замыканию цепи (рис. 2, [45], участок D). В результате этого мемристор переходит в низкоомное состояние (SET). При подаче напряжения противоположной полярности в электрохимически активном электроде происходит полное растворение проводящей нити и мемристор опять переходит в высокоомное состояние (рис. 2, [45], участок E). Очень важную роль для приложения в вычислениях играет скорость переключения элемента из одного состояния в другое. Для твердых электролитов она зависит прежде всего от материала. Так, для сульфида меди Cu_2S время переключения между низкоомным и высокоомным состояниями варьируется от 5 до 32 мкс [57], для сульфида германия Ge_xS_y требуется 250 нс на переключение в низкоомное состояние и 12 мс – в высокоомное [33],

для селенида германия Ge_xSe_y время переключения в состояние SET и RESET составляет 50 нс [56]. Прикладываемое напряжение к электродам не превышает 1,5 В.

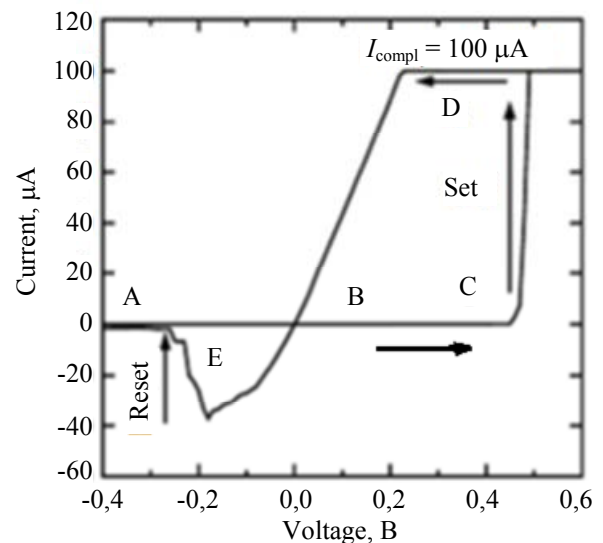


Рис. 2. Вольтамперная характеристика твердого электролита на основе GeS_2 с ограничением по току (I_{compl}).

Для наиболее распространенных твердых электролитов динамический диапазон составляет не менее четырех порядков [33, 47, 48]. Это позволяет как хорошо различать логические «0» и «1», так и получать промежуточные значения сопротивления [45], с помощью ограничения по току при измерении ВАХ [49, 51, 56].

Мемристоры на основе двумерных материалов. Сравнительно недавно было показано энергонезависимое переключение сопротивления в различных морфологиях многослойных двумерных (2D) материалов, включающих функциональные MoS_2 и гибриды на основе дихалькогенидов переходных металлов (transitional metal dichalcogenide (TMD)) [58–61], сопротивление которых может быть изменено между низкоомным (low-resistance state (LRS)) и высокоомным состояниями (a high-resistance state (HRS)) без использования дополнительной энергии. Кроме этого, некоторые исследователи сообщают о энергонезависимом переключении сопротивления (nonvolatile resistance switching (NVR)) в многослойном гексагональном нитриде бора ($h\text{-BN}$) как активного материала [62, 63]. До настоящего времени предполагалось, что

NVRS эффект не может наблюдаться в единичных атомных слоях [58, 64], из-за возможных существенных токов утечки. Sangwan и др. [10] обошли эту проблему, обнаружив, что определенное переупорядочение атомов на определенных гранях в однослойных MoS_2 планарных приборах приводит к эффекту энергонезависимого переключения сопротивления. Однако, для практического применения более предпочтительными являются вертикальные структуры металл-изолятор-металл из-за их малого размера и более плотной интеграции в схемах [13]. Рассмотрим более подробно оба варианта мемристоров, основанных на двумерных планарных и вертикальных слоях, обладающих свойством резистивного переключения.

Планарные 2D мемристоры. Различные фазовые состояния 2D материалов проявляют различные физические свойства. Так, если в фазе 2H проявляются полупроводниковые свойства, то в фазе 1T' проявляются металлические свойства материала с точки зрения электрического транспорта носителей. Такой переход между двумя фазами обеспечивает возможности для разработки новых синаптических приборов на основе 2D материалов. Добавление ионов в 2D структурированные материалы даёт возможность формирования механизма фазового перехода и обеспечивает сильный инструмент для контролирования свойств электрического транспорта 2D материалов. Zhu и др. [65] разработали двухэлектродный планарный MoS_2 мемристор введением ионов лития в MoS_2 слой. Электрическое поле вдоль плоскости контролирует миграцию ионов вдоль плоскости и локально запускает механизм фазового перехода из 2H в 1T' в канале MoS_2 . Этот локальный переход вызывает

изменение контактного сопротивления и приводит к энергонезависимому переключению сопротивления.

Кроме механизма миграции, вызывающего изменение проводимости в 2D материалах, для конструирования искусственного синапса широко используют еще механизм захвата заряда в 2D материале или около него. На рис. 3 [66] показана структура двухзатворного искусственного синапса, основанного на двухслойном графене, проявляющего противоположные электрические свойства, при различных напряжениях на нижнем затворе (V_{bg}) и при одинаковых сигналах, поступающих от верхнего затвора (V_{tg}) [66]. Это различие в электрическом отклике подобно переходу в графене, связанному с уровнем легирования под действием напряжения V_{bg} . Приложение положительного импульса напряжения V_{tg} вызывает миграцию O^{2-} из верхнего диэлектрического слоя (AlO_x) в направлении верхнего затворного электрода. Образованные кислородные вакансии с положительным зарядом могут захватывать электроны из графена. В этом процессе контролирующая роль V_{bg} такая же, как у нейромодулятора (химические сообщения призывающие к изменению активности синапса), при переходе синаптической пластичности между эксцитатным и запрещающим. Основанные на графене синаптические приборы имеют недостаток, связанный с сравнительно большим потреблением энергии. Заменяя графен двумерным MoS_2 можно уменьшить статическую потребляемую энергию синапса с транзистороподобной структурой, обусловленного подавлением тока утечки в закрытом состоянии приложением напряжения на затвор [67].

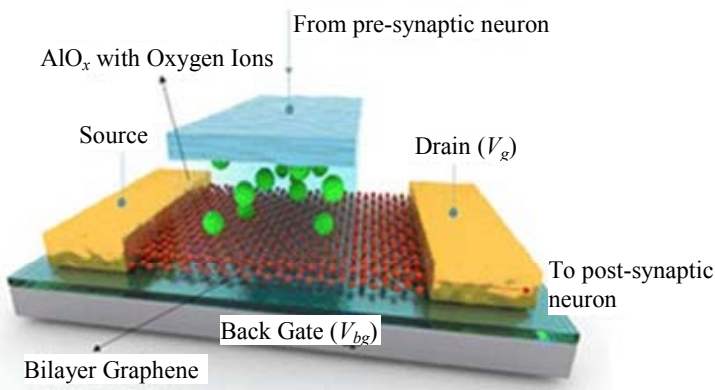


Рис. 3. Синапс на базе графена с диэлектрическим слоем AlO_x и с пластичностью управляемой затвором.

Вертикальные 2D мемристоры. По сравнению с планарными приборами вертикальные приборы более подходят для интеграции в интегральные схемы с высокой плотностью. В отличие от мемристивных приборов на основе металлических оксидов, мемристоры на основе вертикальных 2D материалов проявляют еще одну степень свободы для контролирования и настройки, которая может быть очень полезной при эмуляции различных пластичностей синапсов. Так, в работе [11] показано, что в вертикальном синапсе на основе Pt/*h*-BN (≈ 5 нм)/Cu проводящий филамент формируется только около естественного дефекта в активном слое *h*-BN. Пленочная структура *h*-BN эффективно тормозит боковое расширение проводящего филамента, что контролирует морфологию филамента. Подобное поведение ограничения бокового расширения филамента также наблюдалось в вертикальной структуре Au/(PEA)₂PbBr₄/Gr [68]. Использование широкозонного (PEA)₂PbBr₄ (40 нм) уменьшает рабочий ток до порядка пА. При таком уровне тока демонстрируются основные свойства пластичности синапса, включая как кратковременную (STP), так и долговременную (LTP) пластичности. Формирование каскада из нескольких мемристоров с общими электродами даёт возможность независимому формированию или разрыву филаментов в различных слоях. Это может в свою очередь дать возможность формировать мультиплетные резистивные состояния и другие интересные приложения. Эта идея недавно иллюстрировалась получением вертикального сэндвичного прибора из графена с двумя слоями *h*-BN (≈ 15 нм). На этом образце демонстрировали отдельный контроль формирования и разрыва филаментов в двух *h*-BN слоях для достижения селективной памяти [69, 70]. Кроме настройки резистивных состояний в каскадных мемристивных приборах, управляемые затвором граничные свойства Ван-дер-Ваальсовских гетероструктур, обеспечивают альтернативный способ для настройки резистивных состояний влиянием на формирова-

ние и разрыв филаментов. В традиционных синаптических приборах на основе оксидов переходных металлов реализация перехода между STP и LTP обычно основана на вариации амплитуды и частоты входного импульса напряжения [11, 68]. Однако, в вертикальных структурах Ag/WO_{3-x}/WSe₂/Gr способ модуляции отличается. Здесь модуляция и переход может быть реализованы приложением напряжения на затвор, что существенно упрощает контроль входного сигнала [70]. Рассматриваемый ниже прибор (барристор) изготовлен добавлением к мемристору на основе WO_{3-x} дополнительного каскада WSe₂/Gr (рис. 4, а [70]). Вертикальное сопротивление барристора управляется затвором также, как и высота барьера Шоттки управляется изменением напряжения на затворе. Для различного поперечного смещения на вертикальном приборе, различное напряжение на затворе приводит к падению различного напряжения на WO_{3-x} (≈ 10 нм) слое мемристивного прибора. Как показано на рис. 4, б [70], проводимость барристора может быть увеличена приложением отрицательного напряжения на затвор. Как следствие, большое напряжение должно падать поперек мемристора для реализации энергонезависимого переключения. Без приложения напряжения на затвор Шоттки, барьер является очень высоким на интерфейсе барристора на основе WSe₂/Gr, и таким образом, напряжение между истоком и стоком в основном падает на этот интерфейс. В результате этого только очень маленькое напряжение распределяется на мемристор WO_{3-x} для переключения состояния. Реализация STP и LTP состояний на одном и том же приборе также демонстрировалось на вертикальных гетероструктурах *h*-BN/Gr/*h*BN/MoS₂/Al₂O₃ [71]. Перенос заряда имеет место между различными слоями под действием напряжения на нижнем и верхнем затворах. Этот перенос заряда приводит, соответственно, к резистивному изменению MoS₂. Такой переход в энергонезависимом и энергонезависимом изменении может быть применен для подражания операции принятия решения.

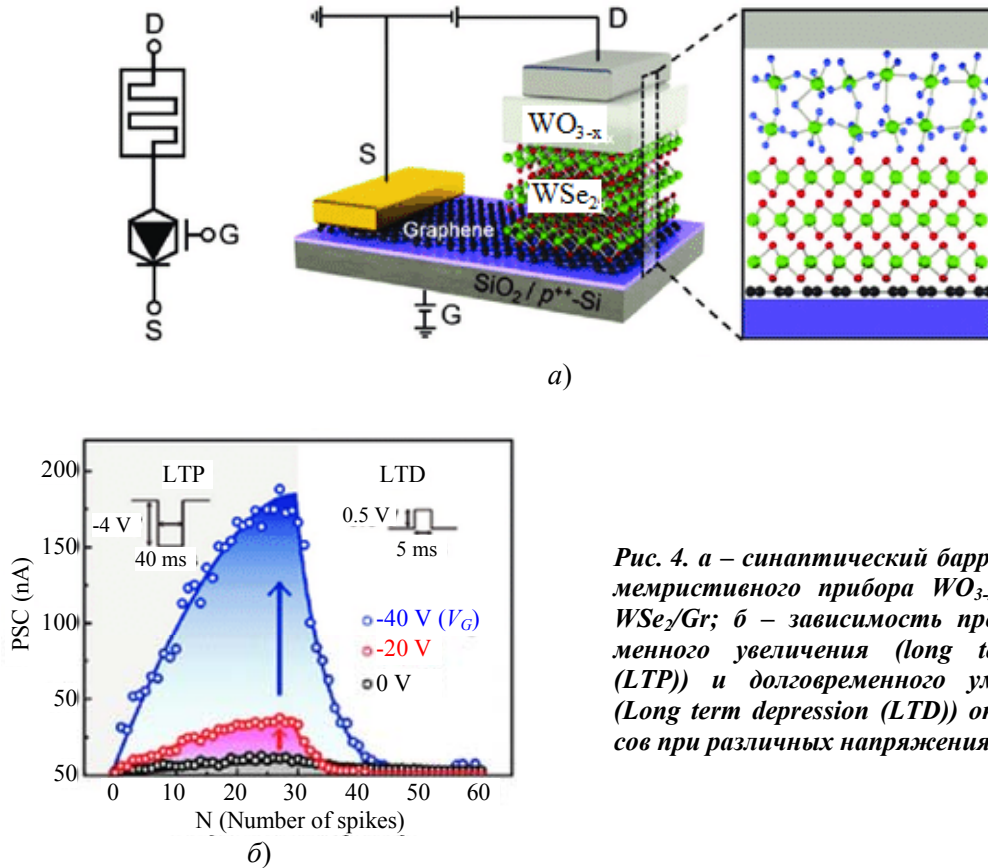


Рис. 4. а – синаптический барристор на основе мемристивного прибора WO_{3-x} и барристора WSe_2/Gr ; б – зависимость процесса долговременного увеличения (long term potentiation (LTP)) и долговременного уменьшения веса (Long term depression (LTD)) от числа импульсов при различных напряжениях на затворе V_G .

И еще одной очень примечательной является работа [12], в которой удалось наблюдать устойчивый эффект энергонезависимого переключения сопротивления в вертикальных мемристорах, основанных на монослойных атомных щитах дихалькогенидов переходных металлов (MoS_2 , $MoSe_2$, WS_2 , WSe_2). Эти мемристоры обладают рядом достоинств, среди которых можно отметить большее чем в сто раз время хранения информации по сравнению с планарным прибором и большим динамическим диапазоном, равным 10^4 . Интересной характеристикой в рассматриваемых приборах является то, что в них наблюдается как биполярное так и монополярное переключение проводимости, ясное физическое объяснение которого, для монослойных приборов, до сих пор не имеется. В работе предполагается наличие нескольких конкурирующих механизмов, влияющих на проводимость атомного слоя в поперечном направлении: образование проводящей нити с меняющимся поперечным сечением или образованием нескольких проводящих нитей; влияние барьера Шоттки на границе дихалькогенид переходного металла – металл; а также влияние границ локализованных зерен.

Основные механизмы изменения проводимости

Основной принцип работы мемристоров основан на сохранении и изменении проводимости активного слоя, в определенном диапазоне между минимальным и максимальным значениями. Физические механизмы изменения проводимости могут быть совершенно различными и в основном зависят от материала активного слоя, материала электродов, структуры мемристора. Хотя все физические принципы переключения резистивного состояния до конца не выяснены, предложены несколько основных механизмов хорошо объясняющих изменение проводимости активных слоев между электродами мемристоров. Ниже рассмотрены некоторые из этих основных механизмов переключения.

Изменения фазового состояния. Принцип работы некоторых мемристоров основан на изменении проводимости рабочего слоя вызванным изменением его фазового состояния. В частности на этом принципе основана работа мемристоров на основе халькогенидов. Под действием электрического тока халькогениды могут изменять свое фазовое состояние

из поликристаллического в аморфное и наоборот. Большое различие между значениями электрического сопротивления в поликристаллической и аморфной фазах позволяет использовать халькогенид в качестве материала мемристора. Халькогенид может достаточно быстро переходить из аморфного состояния в поликристаллическое и обратно в результате нагрева и последующего охлаждения. Изменение резистивного состояния элемента памяти происходит путем подачи электрического импульса соответствующей амплитуды и длительности.

Состояние RESET (логический «0»), соответствующее состоянию с высоким сопротивлением образца, создается путем подачи короткого по времени импульса с высокой амплитудой, достаточного для плавления материала и последующего быстрого охлаждения образца. Таким образом халькогенид переходит в стабильное аморфное состояние. Для перехода в состояния SET (логическая «1») на образец подается длительный по времени, но с меньшей амплитудой импульс, позволяющий нагреть материал ниже температуры плавления и выше температуры кристаллизации.

Филаментарный механизм. Одним из основных механизмов, объясняющих переключение проводимости под действием прикладываемого напряжения, является филаментарный (от слова филамент-проводящая нить) механизм. Основой филаментарного механизма является образование проводящего филамента в рабочем слое между двумя электродами за счет дрейфа ионов металла или вакансий и/или ионов кислорода [72] (рис. 5 [14]).

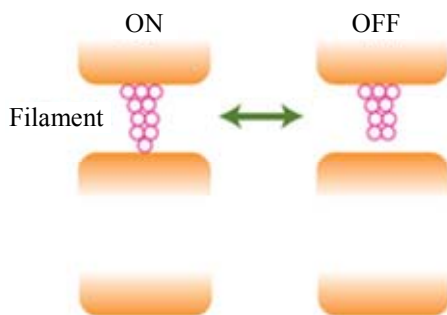


Рис. 5. Филаментарное резистивное переключение. При замыкании электродов филаментом мемристор находится в низкоомном состоянии (ON), а при размыкании переходит в высокоомное состояние (OFF).

Формирование металлического филамента является наиболее предпочтительным механизмом для объяснения переключения сопротивления в неорганических [73–76], а также и в некоторых органических [77, 78] мемристорах. Согласно этой модели при приложении положительного напряжения к активному электроду материал электрохимически окисляется и образованные катионы мигрируют через изолирующий слой до достижения катода. Благодаря этому движению металлических ионов, образованных в результате окисления одного из ионов электродов прибора, образуется филамент. Этот процесс, в частности, наблюдается при использовании алюминиевого электрода, который является легко окисляемым металлом [79]. При достижении ионами противоположного электрода они собираются и начинают заполнять все расстояние между электродами. Когда филамент доходит достаточно близко к анодному электроду сопротивление между электродами резко падает, переходя из высокоомного состояния (HRS) в низкоомное состояние (LRS). Этот механизм характеризуется очень резким переходом между уровнями протекающих токов. Изменение полярности напряжения, а значит и направления электрического поля, вызывает обратный дрейф металлических ионов, что приводит к разрыву филамента. Металлическая филаментарная модель используется также для объяснения переключения сопротивления в тонких пленках окислов графена, используемых в качестве активного слоя между реактивными металлическими электродами [77, 80, 81].

Jeong и др. [82] в своей пионерской работе, где в качестве рабочего слоя был использован оксид графена между двумя алюминиевыми электродами, резистивное переключение объясняли формированием/разрушением локальных филаментов в тонком изолирующем слое на границе между верхним алюминиевым электродом и объемной пленкой оксида графена. Авторы предположили, что эти филаменты образованы переносом ионов кислорода между изолирующим барьером (AlO_x) на границе верхнего электрода и оксидом графена (рис. 6) [83].

В обычном состоянии граница Al/оксид графена является аморфной и неоднородной. Этот граничный слой является изолирующим

и обеспечивает высокоомное состояние HRS. Под действием смещения противоположной полярности и вызванным им дрейфом кислорода в оксид графена образуется проводящий филамент. Таким образом кислород поступает в объем оксида графена, уменьшая изолирующий барьер и становясь причиной перехода в низкоомное состояние LRS.

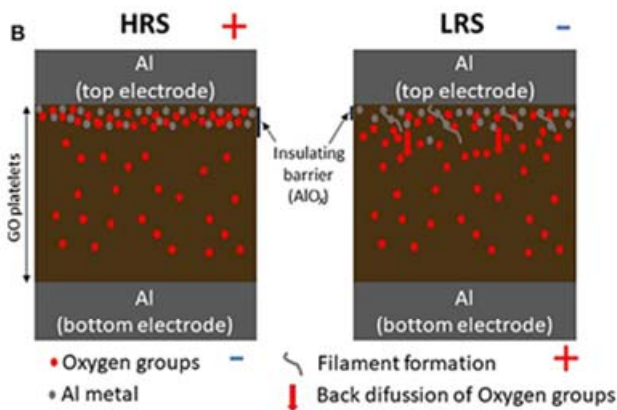


Рис. 6. Модель резистивного переключения в оксиде графена. Сформированный прибор находится в HRS состоянии благодаря изолирующему слою образованному реакцией окисления между верхним Al электродом и пленкой оксида графена; LRS состояние индуцируется формированием филамента на верхнем граничном слое из-за дрейфа ионов кислорода под действием отрицательного напряжения на верхнем электроде.

Достоинства и проблемы мемристивного элемента

Одним из основных достоинств мемристора является обеспечение ультравысокой интегральной плотности памяти, которая может быть прямо интегрирована в процессор и таким образом способствует улучшению энергетической эффективности и скорости работы системы. Время хранения данных в постоянных запоминающих устройствах также является особенно важным. Эта характеристика в некоторых типах мемристоров является очень высокой и при определенных условиях составляет более 10 лет. Важным достоинством во многих приложениях является механическая гибкость, которая имеет место в мемристорах на основе двумерных материалов.

В используемых в настоящее время элементах памяти флуктуации параметров, вызванные технологическими процессами могут

вызвать ухудшение характеристик и даже деградацию цифровых схем на основе этих элементов памяти. Напротив, нейронные сети на основе мемристоров показывают высокую ошибкоустойчивость к такого рода флуктуациям и различным неоднородностям.

Наряду с достоинствами мемристоры обладают также определенными недостатками. В частности, при использовании в нейроморфных сетях с высокой точностью обучения требуется линейная зависимость обновления веса (проводимости) мемристора от импульса напряжения. Однако, в реальных мемристорах обновление веса (зависимость проводимости от импульса) является нелинейной и асимметричной. Отношение весов мемристоров в крайних стабильных состояниях ON/OFF является ограниченным, в то время как в программно-обеспеченных нейронных сетях это соотношение является неограниченным. Кроме этого, параметры мемристоров могут меняться от прибора к прибору и от цикла к циклу. Эти недостатки могут заметно повлиять на точность обучения мемристоров.

Заключение

В заключении можно отметить, что мемристоры имеют огромный потенциал для развития будущих вычислительных систем. Высокая плотность памяти, возможность прямой интеграции в процессор, энергонезависимость мемристоров могут существенно улучшить совершенство классических компьютеров, а также они могут найти приложение в машинно-обучающихся системах к чипам предназначенных для Интернета Вещей. Дальнейшее совершенствование технологии мемристоров и его архитектуры может обеспечить его эффективное приложение в нейроморфном вычислении и при организации искусственного интеллекта.

Приведенные в обзоре виды и типы мемристоров являются только частью исследуемых в настоящее время мемристоров. Их ряды пополняются с каждым днем мемристорами на основе новых материалов и с новой архитектурой. Физические механизмы резистивного переключения, приведенные в обзоре, являются на данный момент самыми

общеизвестными, но не все механизмы и физика этих механизмов до конца ясны. В частности, объяснение механизма резистивного переключения в мемристорах на основе двумерных материалов находится только в зачаточном состоянии и предстоит еще провести много исследований для раскрытия механизмов этого явления.

Таким образом, создание энергонезависимой памяти на основе мемристивных структур является весьма перспективным и в настоящее время интенсивно развивается во всем мире с большими темпами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jo S. H., et al. // Nano Lett. 2010. Vol. 10. P. 1297.
2. Zidan M. A., Strachan J. P., Lu W. D. // Nature Electronics 2018. Vol. 1. P. 22.
3. Shimeng Yu. // Proceedings of the IEEE. February 2018. Vol. 10. № 2. P. 260.
4. Hu S. G., Wu S. Y., Jia W. W., Yu Q., Deng L. J., Fu Y. Q., Liu Y., Chen T. P. Review of Nanostructured Resistive Switching Memristor and Its Applications // Nanoscience and Nanotechnology Letters. 2014. Vol. 6. P. 729.
5. Tan C., Liu Z., Huang W., Zhang H. // Chem. Soc. Rev. 2015. Vol. 44. № 9. P. 2615.
6. Bessonov A. A., Kirikova M. N., Petukhov D. I., Allen M., Ryhänen T., Bailey M. J. A. // Nat. Mater. 2014. Vol. 14. № 2. P. 199.
7. Son D., Chae S. I., Kim M., Choi M. K., Yang J., Park K., Kale V. S., Koo J. H., Choi C., Lee M., Kim J. H., Hyeon T., Kim D.-H. // Adv. Mater. 2016. Vol. 28. № 42. P. 9326.
8. Hao C., Wen F., Xiang J., Yuan S., Yang B., Li L., Wang W., Zeng Z., Wang L., Liu Z., Tian Y. // Adv. Funct. Mater. 2016. Vol. 26. № 12. P. 2016.
9. Tan C., Zhang H. // Chem. Soc. Rev. 2015. Vol. 44. № 9. P. 2713.
10. Sangwan V. K., Jariwala D., Kim I. S., Chen K.-S., Marks T. J., Lauhon L. J., Hersam M. C. // Nat. Nanotechnol. 2015. Vol. 10. № 5. P. 403.
11. Shi Y., Liang X., Yuan B., Chen V., Li H., Hui F., Yu Z., Yuan F., Pop E., Wong H. S. P., Lanza M. // Nat. Electron. 2018. Vol. 1. P. 458.
12. Ruijing Ge, Xiaohan Wu, Myungsoo Kim, Jianping Shi, Sushant Sonde, Li Tao, Yanfeng Zhang, Jack C. Lee, Deji Akinwande. Atomristor: Nonvolatile Resistance Switching in Atomic Sheets of Transition Metal Dichalcogenides // Nano Lett. 2018. Vol. 18. P. 434.
13. Chen-Yu Wang, Cong Wang, Fanhao Meng, Pengfei Wang, Shuang Wang, Shi-Jun Liang, Feng Miao // Adv. Electron. Mater. 2019. P. 1901107.
14. Sangwan V. K., Hersam M. C. // Nature Nanotechnology. March 2020. DOI: 10.1038/s41565-020-0647-z
15. Белов А. Н., Перевалов А. А., Шевяков В. И. Мемристорные структуры для микро- и нанoeлектроники. Физика и технология. Обзор // Изв. вузов. Электроника. 2017. Т. 22. № 4. С. 305.
16. Chua L. O. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 1021. № 4. P. 765.
17. Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R. // Nat. Nanotechnol. 2013. Vol. 8. № 1. P. 13.
18. Prezioso M., et al. / Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors // Nature. 2015. Vol. 521. P. 61.
19. Burr G. W., et al. // Adv. Phys. 2017. X 2. P. 89.
20. Zidan M. A., Strachan J. P., Lu W. D. The future of electronics based on memristive systems // Nat. Elect. 2018. Vol. 1. P. 22.
21. Tuma T., et al. Stochastic phase-change neurons // Nat. Nanotechnol. 2016. Vol. 11. № 8. P. 693.
22. Duygu K., Shimeng Y., Wong H. S. P. // Nanotechnology. 2013. Vol. 24. № 38. P. 382001.
23. Wong H. S. P., et al. // Proc. IEEE. 2012. Vol. 100. № 6. P. 1951.
24. Yu S., Chen P. Y. // IEEE Sol. Stat. Circuit Mag. 2016. Vol. 8. P. 43.
25. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. // Nature. 2008. Vol. 453. P. 80.
26. Sengupta A., Roy K. // Appl. Phys. Exp. 2018. Vol. 11. № 3. P. 030101.
27. Chen P. Y., et al. / "Mitigating effects of nonideal synaptic device characteristics for on-chip learning," in Proc. IEEE/ACM Int. Conf. Comput.-Aided Design (ICCAD). Nov. 2015, pp. 194–199.
28. Wang I. T., Chang C. C., Chiu L. W., Chou T., Hou T. H. // Nanotechnology. 2016. Vol. 27. № 8. P. 365204.
29. Garbin D. / "Variability-tolerant convolutional neural network for pattern recognition applications based on OxRAM synapses," in IEDM Tech. Dig., 2014.
30. Hiroyasu Kawano, Keiji Shono, Manabu Gomi, Takeshi Yokota. Resistance variable element. Patent. US 8188466. 2012.
31. Wong P. H. S., Lee H. Y., Yu S., Chen Y. S., Wu Y., Chen P. S., Lee B., Chen F. T., Tsai M.-J. // Proceedings of the IEEE. 2012. Vol. 100. № 6. P. 1951.
32. Liu Q., Long S., Lv H., Wang W., Niu J. // Acsnano. 2010. Vol. 4. № 10. P. 6162.
33. Gopalan C., Ma Y., Gallo T., Wang J., Runnion E., Saenz J. // Solid-State Electronics. 2011. Vol. 58. P. 54.
34. Jeong D. S., Schroeder H., Breuer U., Waser R. // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. P. 123716.
35. Lu W., Jeong D. S., Kozicki M., Waser R. Electrochemical metallization cells-blending nanoionics into nanoelectronics // MRS Bulletin. 2012. Vol. 37. P. 124.
36. Chen A., Hutchby J., Zhirnov V., Bourianoff G. Emerging nanoelectronic devices. – Wiley, 2015.
37. Qureshi M. K., Srinivasan V., Rivers J. A. Scalable high performance main Memory system using phase-change memory technology ISCA'09 (Austin, Texas, USA, 2009). P. 24–33.
38. Beneventi G. B. Characterization and modeling of phase-change memories. LAMBERT Academic Publishing. 2012. P. 1–109.
39. Hudgens S., Johnson B. // Overview of phase-change chalcogenide nonvolatile memory technology // MRS Bulletin. 2004. Vol. 29. № 11. P. 829.
40. Pirovano A., Lacaita A. L., Benvenuti A., et al. / Scaling analysis of phase-change memory technology. Proc. of the IEEE Int. (Electron Devices Meeting (IEDM 03). – IEEE Press, 2003), pp. 29.6.1–29.6.4.

41. Li Y., Zhong Y., Xu L., et al. // Scientific Reports. 2013. Vol. 3. P. 1.
42. Simpson R. E., Fons P., Kolobov A. V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. P. 021.
43. Hong S. H., Bae B. J., Lee H. // Nanotechnology. 2010. Vol. 21. P. 025703.
44. Burr G. W., Breitwisch M. J., Franceschini M., Garetto D. // J. of Vacuum Science and Technology B. 2010. Vol. 28. № 2. P. 223.
45. Goux L., Lisoni J. D., Jurczak M., Wouters D. J., Courtade L. // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 107. P. 024512.
46. Waser R., Alibart F., Gao L., Hoskins B. D., Strukov D. B. // Nanotechnology. 2012. Vol. 23. P. 075201.
47. Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R. // Nature Nanotechnology. 2013. Vol. 8. P. 13.
48. Symanczyk R., Balakrishnan M., Gopalan C., Happ T., Kozicki M., Kund M., Mikolajick T., Mitkova M., Park M., Pinnow C., Robertson J., Ufert K. / Electrical characterization of solid state ionic memory elements. (Proc. of the 2003 Non-Volatile Memory Technology Symposium. San Diego, California, 2003), pp. 17–1.
49. Kozicki M. N., Park M., Mitkova M. // IEEE Transactions on Nanotechnology. 2005. Vol. 4. № 3. P. 31.
50. Valov I., Waser R., Jameson J. R., Kozicki M. N. // Nanotechnology. 2011. Vol. 22. P. 254003.
51. O'Kelly C., Fairfield J. A., Boland J. J. // ACS Nano. 2014. № 8. P. 11724.
52. Waser R. / Electrochemical and thermochemical memories (IEEE International Electron Devices Meeting–2008). IEEE Press. – 2008, pp. 1.
53. Yang Y., Gao P., Gaba S., et al. // Nature communications. 2012. Vol. 3. № 732. P. 1.
54. Bruchhaus R., Honal M., Symanczyk R., Kund M. // J. of the Electrochemical Society. 2009. Vol. 156. № 9. P. H729.
55. Yang F., Miao M., Pickett D., et al. // J. Nanotechnology. 2009. Vol. 20. P. 215201.
56. Dietrich S., Angerbauer M., Ivanov M., et al. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2007. Vol. 42. № 4. P. 839.
57. Kaeriyama S., Sakamoto T., Sunamura H., Mizuno M. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2005. Vol. 40. № 1. P. 168.
58. Tan C., Liu Z., Huang W., Zhang H. // Chem. Soc. Rev. 2015. Vol. 44. № 9. P. 2615.
59. Bessonov A. A., Kirikova M. N., Petukhov D. I., Allen M., Ryhänen T., Bailey M. J. A. // Nat. Mater. 2014. Vol. 14. № 2. P. 199.
60. Son D., Chae S. I., Kim M., Choi M. K., Yang J., Park K., Kale V. S., Koo J. H., Choi C., Lee M., Kim J. H., Hyeon T., Kim D.-H. // Adv. Mater. 2016. Vol. 28. № 42. P. 9326.
61. Hao C., Wen F., Xiang J., Yuan S., Yang B., Li L., Wang W., Zeng Z., Wang L., Liu Z., Tian Y. // Adv. Funct. Mater. 2016. Vol. 26. № 12. P. 2016.
62. Qian K., Tay R. Y., Nguyen V. C., Wang J., Cai G., Chen T., Teo E. H. T., Lee P. S. // Adv. Funct. Mater. 2016. Vol. 26. № 13. P. 2176.
63. Pan C., Ji Y., Xiao N., Hui F., Tang K., Guo Y., Xie X., Puglisi F. M., Larcher L., Miranda E., Jiang L., Shi Y., Valov I., McIntyre P. C., Waser R., Lanza M. // Adv. Funct. Mater. 2017. Vol. 27. P. 1604811.
64. Tan C., Zhang H. // Chem. Soc. Rev. 2015. Vol. 44. № 9. P. 2713.
65. Zhu X., Li D., Liang X., Lu W. D. // Nat. Mater. 2019. Vol. 18. P. 141.
66. Tian H., Mi W., Wang X.-F., Zhao H., Xie Q.-Y., Li C., Li Y.-X., Yang Y., Ren T.-L. // Nano Lett. 2015. № 15. P. 8013.
67. Arnold A. J., Razavieh A., Nasr J. R., Schulman D. S., Eichfeld C. M., Das S. // ACS Nano. 2017. Vol. 11. P. 3110.
68. Tian H., Zhao L., Wang X., Yeh Y.-W., Yao N., Rand B. P., Ren T.-L. // ACS Nano. 2017. Vol. 11. P. 12247.
69. Sun L., Zhang Y., Han G., Hwang G., Jiang J., Joo B., Watanabe K., Taniguchi T., Kim Y.-M., Yu W. J., Kong B.-S., Zhao R., Yang H. // Nat. Commun. 2019. Vol. 10. P. 3161.
70. Huh W., Jang S., Lee J. Y., Lee D., Lee D., Lee J. M., Park H. G., Kim J. C., Jeong H. Y., Wang G., Lee C.-H. // Adv. Mater. 2018. Vol. 30. P. 1801447.
71. Chen H., Liu C., Wu Z., He Y., Wang Z., Zhang H., Wan Q., Hu W., Zhang D. W., Liu M., Liu Q., Zhou P. // Adv. Sci. 2019. Vol. 6. P. 1901072.
72. Romero F. J., Toral A., Medina-Rull A., Moraila-Martinez C. L., Morales D. P., Ohata A., Godoy A., Ruiz F. G., Rodriguez N. // Front. Mater. 2020. 7:17. doi: 10.3389/fmats.2020.00017
73. Van den Hurk J., Menzel S., Waser R., Valov I. // J. Phys. Chem. C. 2015. Vol. 119. P. 18678. doi: 10.1021/acs.jpcc.5b03622
74. Mohammad B., Jaoude M. A., Kumar V., Al-Homouz D. M., Nahla H. A., Al-Qutayri M., et al. // Nanotechnol. Rev. 2015. Vol. 5. P. 311. doi: 10.1515/ntrev-2015-0029
75. Li Y., Zhang M., Long S., Teng J., Liu Q., Lv H., et al. // Scient. Rep. 2017. 7:11204. doi: 10.1038/s41598-017-11165-5
76. Wang C., Wu H., Gao B., Zhang T., Yang Y., Qian H. // Microelectr. Eng. 2018. Vol. 187–188. P. 121. doi: 10.1016/j.mee.2017.11.003
77. He C. L., Zhuge F., Zhou X. F., Li M., Zhou G. C., Liu Y. W., et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. 95:232101. doi: 10.1063/1.3271177
78. Sparvoli M., Gazziro M. A., Marma J. S., Zucchi G. / “Memristor device fabricated from doped graphene oxide,” in 2019 IEEE 10th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS) (Armenia). doi: 10.3390/nano9040518
79. Pradhan S. K., Xiao B., Mishra S., Killam A., Pradhan A. K. // Scient. Rep. 2016. Vol. 6. P. 26763. doi: 10.1038/srep26763
80. Waser R., Aono M. // Nat. Mater. 2007. Vol. 6. P. 833.
81. Porro S., Ricciardi C. // RSC Adv. 2015. Vol. 5. P. 68565.
82. Jeong H. Y., Kim J. Y., Kim J. W., Hwang J. O., Kim J. E., Lee J. Y., et al. // Nano Lett. 2010. Vol. 10. P. 4381.
83. Romero F. J., Toral A., Medina-Rull A., Moraila-Martinez C. L., Morales D. P., Ohata A., Godoy, Rodriguez Francisco G. Ruiz and Noel. Resistive Switching in Graphene Oxide // Front. Mater. January 2020. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00017>

Memristor – basic element of the future Artificial Intelligence. Types and the basic characteristics (*a review*)

A. Yusupov^{1,2}, H. Sh. Saparov², and A. E. Atamuratov²

¹ Tashkent University of Information Technologies
108 A. Temur st., Tashkent, 100200, Uzbekistan

² Urgench State University
14 Kh. Olimjan, Urgench, 200100, Uzbekistan

Received August 05, 2020

In the review paper the memristor is considered as one of the basic elements of the neuromorphic computation, particularly of the future Artificial Intelligence. Implementation of artificial neural networks in a memristor crossbar is noted. Magnitudes, which characterises the main characteristics of memristor of all types is described. Memristors on the base of different active layers were analysed. Particularly special attention was devoted to 2D material based planar and vertical memristors. Separately, physical mechanisms of resistive switching in memristors is considered. At the end of the paper the main merits and challenges of the memristors in compaign with memory elements of classical computers are listed.

Keywords: memristor, neuromorphic computation, artificial intelligens, resistive switching, filament, transition metal chalkogenides, solid electrolits, metal oxide, synaps, neuron.

REFERENCES

1. S. H. Jo, et al., *Nano Lett.* **10**, 1297 (2010).
2. M. A. Zidan, Strachan J. P., and Lu W. D., *Nature Electronics* **1**, 22 (2018).
3. Yu. Shimeng, *Proceedings of the IEEE* **10** (2), 260 (2018).
4. S. G. Hu, S. Y. Wu, W.W. Jia, Q. Yu, L. J. Deng, Y. Q. Fu, Y. Liu, and T. P. Chen, *Review of Nanostructured Resistive Switching Memristor and Its Applications*, *Nanoscience and Nanotechnology Letters* **6**, 729 (2014).
5. C. Tan, Z. Liu, W. Huang, and H. Zhang, *Chem. Soc. Rev.* **44** (9), 2615 (2015).
6. A. A. Bessonov, M. N. Kirikova, D. I. Petukhov, M. Allen, T. Ryhänen, and M. J. A. Bailey, *Nat. Mater.* **14** (2), 199 (2014).
7. D. Son, S. I. Chae, M. Kim, M. K. Choi, J. Yang, K. Park, V. S. Kale, J. H. Koo, C. Choi, M. Lee, J. H. Kim, T. Hyeon, and D.-H. Kim, *Adv. Mater.* **28** (42), 9326 (2016).
8. C. Hao, F. Wen, J. Xiang, S. Yuan, B. Yang, L. Li, W. Wang, Z. Zeng, L. Wang, Z. Liu, and Y. Tian, *Adv. Funct. Mater.* **26** (12) 2016 (2016).
9. C. Tan, and H. Zhang, *Chem. Soc. Rev.* **44** (9), 2713 (2015).
10. V. K. Sangwan, D. Jariwala, I. S. Kim, K.-S. Chen, T. J. Marks, L. J. Lauhon, and M. C. Hersam, *Nat. Nanotechnol.* **10** (5), 403 (2015).
11. Y. Shi, X. Liang, B. Yuan, V. Chen, H. Li, F. Hui, Z. Yu, F. Yuan, E. Pop, H. S. P. Wong, and M. Lanza, *Nat. Electron.* **1**, 458 (2018).
12. Ruijing Ge, Xiaohan Wu, Myungsoo Kim, Jianping Shi, Sushant Sonde, Li Tao, Yanfeng Zhang, Jack C. Lee, and Deji Akinwande, *Atomristor: Nonvolatile Resistance Switching in Atomic Sheets of Transition Metal Dichalcogenides*. *Nano Lett.* **18**, 434 (2018).
13. Chen-Yu Wang, Cong Wang, Fanhao Meng, Pengfei Wang, Shuang Wang, Shi-Jun Liang, and Feng Miao, *Adv. Electron. Mater.* 1901107 (2019).
14. K. V. Sangwan and C. M. Hersam, *Nature Nanotechnology*. March 2020. DOI: 10.1038/s41565-020-0647-z
15. A. N. Belov, A. A. Perevalov, and V. I. Shevyakov, *Physics-Technological Fabrication of Memresistors for Micro- and Nanoelectronics. Review*, *Proc. of Universities. Electronics* **22** (4), 305 (2017). DOI: 10.21415/1561-5405-2017-22-4-305-321.
16. L. O. Chua, *Appl. Phys. Lett.* **1021** (4), 765 (2011).
17. J. J. Yang, D. B. Strukov, and D. R. Stewart, *Nat. Nanotechnol* **8** (1), 13 (2013).
18. M. Prezioso, et al., *Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors*. *Nature* **521**, 61 (2015).
19. G. W. Burr, et al., *Adv. Phys. X* **2**, 89 (2017).

20. M. A. Zidan, J. P. Strachan, and W. D. Lu, *The future of electronics based on memristive systems*. Nat. Elect. **1**, 22 (2018).
21. T. Tuma, et al. *Stochastic phase-change neurons*. Nat. Nanotechnol. **11** (8), 693 (2016).
22. K. Duygu, Y. Shimeng, and H. S. P. Wong, *Nanotechnology* **24** (38), 382001 (2013).
23. H. S. P. Wong, et al., Proc. IEEE **100** (6), 1951 (2012).
24. S. Yu and P. Y. Chen, IEEE Sol. Stat. Circuit Mag **8**, 43 (2016).
25. D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, Nature **453**, 80 (2008).
26. A. Sengupta and K. Roy, Appl. Phys. Exp. **11** (3), 030101 (2018).
27. P. Y. Chen, et al. “Mitigating effects of nonideal synaptic device characteristics for on-chip learning,” in Proc. IEEE/ACM Int. Conf. Comput.-Aided Design (ICCAD). Nov. 2015. pp. 194–199.
28. I. T. Wang, C. C. Chang, L. W. Chiu, T. Chou, and T. H. Hou, Nanotechnology **27** (8), 365204 (2016).
29. D. Garbin, “Variability-tolerant convolutional neural network for pattern recognition applications based on OxRAM synapses,” in IEDM Tech. Dig., 2014.
30. Hiroyasu Kawano, Keiji Shono, Manabu Gomi, Takeshi Yokota. Resistance variable element. Patent. US 8188466. 2012.
31. P. H. S. Wong, H. Y. Lee, S. Yu, Y. S. Chen, Y. Wu, P. S. Chen, B. Lee, F. T. Chen, and M.-J. Tsai, Proceedings of the IEEE **100** (6), 1951 (2012).
32. Q. Liu, S. Long, H. Lv, W. Wang, and J. Niu, Acsnano **4** (10), 6162 (2010).
33. C. Gopalan, Y. Ma, T. Gallo, J. Wang, E. Runnion, and J. Saenz, Solid-State Electronics **58**, 54 (2011).
34. D. S. Jeong, H. Schroeder, U. Breuer, and R. Waser, J. Appl. Phys. **104**, 123716 (2008).
35. W. Lu, D. S. Jeong, M. Kozicki, and R. Waser, *Electrochemical metallization cells-blending nanoionics into nanoelectronics*. MRS Bulletin **37**, 124 (2012).
36. A. Chen, J. Hutchby, V. Zhirnov, and G. Bourianoff, *Emerging nanoelectronic devices* (Wiley, 2015).
37. M. K. Qureshi, V. Srinivasan, and J. A. Rivers. *Scalable high performance main Memory system using phase-change memory technology ISCA'09* (Austin, Texas, USA, 2009), pp. 24–33.
38. G. B. Beneventi, *Characterization and modeling of phase-change memories*. LAMBERT Academic Publishing, 2012. pp. 1–109.
39. S. Hudgens and B. Johnson, *Overview of phase-change chalcogenide nonvolatile memory technology*, MRS Bulletin **29** (11), 829 (2004).
40. A. Pirovano, A. L. Lacaita, A. Benvenuti, et al., Scaling analysis of phase-change memory technology. Proc. of the IEEE Int. (Electron Devices Meeting (IEDM 03). – IEEE Press, 2003). pp. 29.6.1–29.6.4.
41. Y. Li, Y. Zhong, L. Xu, et al., Scientific Reports **3**, 1 (2013).
42. R. E. Simpson, P. Fons, A. V. Kolobov, et al., Appl. Phys. Lett. **100**, 021 (2012).
43. S. H. Hong, B. J. Bae, and H. Lee, Nanotechnology **21**, 025703 (2010).
44. G. W. Burr, M. J. Breitwisch, M. Franceschini, and D. Garetto, J. of Vacuum Science and Technology B. **28** (2), 223 (2010).
45. L. Goux, J. D. Lisoni, M. Jurczak, D. J. Wouters, and L. Courtade, J. Appl. Phys. **107**, 024512 (2010).
46. R. Waser, F. Alibart, L. Gao, B. D. Hoskins, and D. B. Strukov, Nanotechnology **23**, 075201 (2012).
47. J. J. Yang, D. B. Strukov, and D. R. Stewart, Nature Nanotechnology **8**, 13 (2013).
48. R. Symanczyk, M. Balakrishnan, C. Gopalan, T. Happ, M. Kozicki, M. Kund, T. Mikolajick, M. Mitkova, M. Park, C. Pinnow, J. Robertson, and K. Ufert, *Electrical characterization of solid state ionic memory elements* (Proc. of the 2003 Non-Volatile Memory Technology Symposium. San Diego, California, 2003), pp. 17–1.
49. M. N. Kozicki, M. Park, and M. Mitkova, IEEE Transactions on Nanotechnology **4** (3), 31 (2005).
50. I. Valov, R. Waser, J. R. Jameson, and M. N. Kozicki, Nanotechnology **22**, 254003 (2011).
51. C. O’Kelly, J. A. Fairfield, and J. J. Boland, ACS Nano, № 8, 11724 (2014).
52. R. Waser, *Electrochemical and thermochemical memories* (IEEE International Electron Devices Meet-ing–2008). IEEE Press. 2008, pp. 1–4.
53. Y. Yang, P. Gao, S. Gaba, et al., Nature communications **3** (732), 1 (2012).
54. R. Bruchhaus, M. Honal, R. Symanczyk, and M. Kunda, J. of the Electrochemical Society **156** (9), H729 (2009).
55. F. Yang, M. Miao, D. Pickett, et al., J. Nanotechnology **20**, 215201 (2009).
56. S. Dietrich, M. Angerbauer, M. Ivanov, et al., IEEE Journal of Solid-State Circuits **42** (4), 839 (2005).
57. S. Kaeriyama, T. Sakamoto, H. Sunamura, and M. Mizuno, IEEE Journal of Solid-State Circuits **40** (1), 168 (2005).
58. C. Tan, Z. Liu, W. Huang, and H. Zhang, Chem. Soc. Rev. **44** (9), 2615 (2015).
59. A. A. Bessonov, M. N. Kirikova, D. I. Petukhov, M. Allen, T. Ryhänen, and M. J. A. Bailey, Nat. Mater. **14** (2), 199 (2014).
60. D. Son, S. I. Chae, M. Kim, M. K. Choi, J. Yang, K. Park, V. S. Kale, J. H. Koo, C. Choi, M. Lee, J. H. Kim, T. Hyeon, and D.-H. Kim, Adv. Mater. **28** (42), 9326 (2016).
61. C. Hao, F. Wen, J. Xiang, S. Yuan, B. Yang, L. Li, W. Wang, Z. Zeng, L. Wang, Z. Liu, and Y. Tian, Adv. Funct. Mater. **26** (12), 2016 (2016).
62. K. Qian, R.Y. Tay, V. C. Nguyen, J. Wang, G. Cai, T. Chen, E. H. T. Teo, and P. S. Lee, Adv. Funct. Mater. **26** (13), 2176 (2016).
63. C. Pan, Y. Ji, N. Xiao, F. Hui, K. Tang, Y. Guo, X. Xie, F. M. Puglisi, L. Larcher, E. Miranda, L. Jiang, Y. Shi, I. Valov, P.C. McIntyre, R. Waser, and M. Lanza, Adv. Funct. Mater. **27**, 1604811 (2017).
64. C. Tan and H. Zhang, Chem. Soc. Rev. **44** (9), 2713 (2015).

65. X. Zhu, D. Li, X. Liang, and W. D. Lu, *Nat. Mater.* **18**, 141 (2019).
66. H. Tian, W. Mi, X.-F. Wang, H. Zhao, Q.-Y. Xie, C. Li, Y.-X. Li, Y. Yang, and T.-L. Ren, *Nano Lett.*, № 15, 8013 (2015).
67. A. J. Arnold, A. Razavieh, J. R. Nasr, D. S. Schulman, C. M. Eichfeld, and S. Das, *ACS Nano* **11**, 3110 (2017).
68. H. Tian, L. Zhao, X. Wang, Y.-W. Yeh, N. Yao, B. P. Rand, and T.-L. Ren, *ACS Nano* **11**, 12247 (2017).
69. L. Sun, Y. Zhang, G. Han, G. Hwang, J. Jiang, B. Joo, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y.-M. Kim, W. J. Yu, B.-S. Kong, R. Zhao, and H. Yang, *Nat. Commun.* **10**, 3161 (2019).
70. W. Huh, S. Jang, J. Y. Lee, D. Lee, J. M. Lee, H. G. Park, J. C. Kim, H. Y. Jeong, G. Wang, and C.-H. Lee, *Adv. Mater.* **30**, 1801447 (2018).
71. H. Chen, C. Liu, Z. Wu, Y. He, Z. Wang, H. Zhang, Q. Wan, W. Hu, D. W. Zhang, M. Liu, Q. Liu, and P. Zhou, *Adv. Sci.* **6**, 1901072 (2019).
72. F. J. Romero, A. Toral, A. Medina-Rull, C. L. Moraila-Martinez, D. P. Morales, A. Ohata, A. Godoy, F. G. Ruiz, and N. Rodriguez, *Front. Mater* **7**:17 (2020). doi: 10.3389/fmats.2020.00017
73. J. Van den Hurk, S. Menzel, R. Waser, and I. Valov, *J. Phys. Chem C* **119**, 18678 (2015). doi: 10.1021/acs.jpcc.5b03622
74. B. Mohammad, M. A. Jaoude, V. Kumar, D. M. Al Homouz, H. A. Nahla, M. Al-Qutayri, et al., *Nanotechnol. Rev.* **5**, 311 (2015). doi: 10.1515/ntrev-2015-0029
75. Y. Li, M. Zhang, S. Long, J. Teng, Q. Liu, H. Lv, et al., *Scient. Rep.* **7**:11204 (2017). doi: 10.1038/s41598-017-11165-5
76. C. Wang, H. Wu, B. Gao, T. Zhang, Y. Yang, and H. Qian, *Microelectr. Eng.* **187–188**, 121 (2018). doi: 10.1016/j.mee.2017.11.003
77. C. L. He, F. Zhuge, X. F. Zhou, M. Li, G. C. Zhou, Y. W. Liu, et al., *Appl. Phys. Lett.* **95**:232101 (2009). doi: 10.1063/1.3271177
78. M. Sparvoli, M. A. Gazziro, J. S. Marma, and G. Zucchi, “Memristor device fabricated from doped graphene oxide,” in 2019 IEEE 10th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS) (Armenia). doi: 10.3390/nano9040518
79. S. K. Pradhan, B. Xiao, S. Mishra, A. Killam, and A. K. Pradhan, *Scient. Rep.* **6**, 26763 (2016). doi: 10.1038/srep26763
80. R. Waser and M. Aono, *Nat. Mater.* **6**, 833 (2007).
81. S. Porro and C. Ricciardi, *RSC Adv.* **5**, 68565 (2015).
82. H. Y. Jeong, J. Y. Kim, J. W. Kim, J. O. Hwang, J. E. Kim, J. Y. Lee, et al., *Nano Lett.* **10**, 4381 (2010).
83. Romero F. J., Toral A., Medina-Rull A., Moraila-Martinez C. L., P. D. Morales, A. Ohata, A. Godoy, F. G. Ruiz and N. R. *Resistive Switching in Graphene Oxide*. *Front. Mater.*, 31 January 2020 | <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00017>