

О физических процессах в мемристорах**Е. Б. Соловьева[✉], В. А. Смирнов**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия[✉]selenab1@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются физические процессы (окислительно-восстановительные, фазоизменяющие, спиновые и ферроэлектрические), лежащие в основе создания мемристоров. Выполнен сравнительный анализ характеристик и свойств мемристоров, построенных на основе разных физических процессов. К сравниваемым свойствам отнесены масштабируемость, надежность, производительность, а также линейность, симметричность и уровневость – признаки, которые важны в нейроморфных вычислениях. По многим свойствам окисно-восстановительный механизм резистивного переключения определен как перспективный для мемристоров, применяемых в архитектуре фон Неймана и в нейроморфных системах вычисления.

Ключевые слова: мемристор, резистивное переключение, пассивный элемент, нелинейный элемент, нанотехнология

Для цитирования: Соловьева Е. Б., Смирнов В. А. О физических процессах в мемристорах // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 1. С. 90–98. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-1-90-98.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Review article

About Physical Processes in Memristors**E. B. Solovyeva[✉], V. A. Smirnov**

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[✉]selenab1@yandex.ru

Abstract. We consider physical processes that are fundamental for the creation of memristors. These processes include reduction/oxidation reactions, phase-changing, spintronic and ferroelectric phenomena. A comparative analysis of the characteristics and properties of different memristors is presented. The properties under comparison include scalability, reliability, performance, as well as linearity, symmetry and level-sensitivity, which are important in neuromorphic computing. In terms of a number of properties, the mechanism of resistive switching reduction/oxidation is defined as promising for memristors used in von Neumann architecture and in neuromorphic computing systems.

Keywords: memristor, resistive switching, passive element, nonlinear element, nanotechnology

For citation: Solovyeva E. B., Smirnov V. A. About Physical Processes in Memristors // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 1. P. 90–98. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-1-90-98.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Долгое время в электротехнике существовало три пассивных электрических элемента (резистивный, индуктивный и емкостной). Процессы в них описываются четырьмя переменными: заряд, ток, магнитный поток и напряжение. В 1971 г. Леон Чуа – профессор кафедры электротехники и вычислительных систем в Калифорнийском университете в Беркли, теоретически обосновал существование еще одного пассивного элемента, который назвал мемристором (memristor, резистор с памятью) (рис. 1) и ввел его математическое описание [1]–[4]:

$$d\Phi = M(q) dq \Rightarrow u(t) dt = M(q)i(t) dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow u(t) = M(q)i(t) \Rightarrow u(t) = M \left[\int_{-\infty}^t q(t) dt \right] i(t), \quad (1)$$

где Φ – магнитный поток; $M(q)$ – мемристанс; q – заряд; $u(t)$ – напряжение; $i(t)$ – ток.

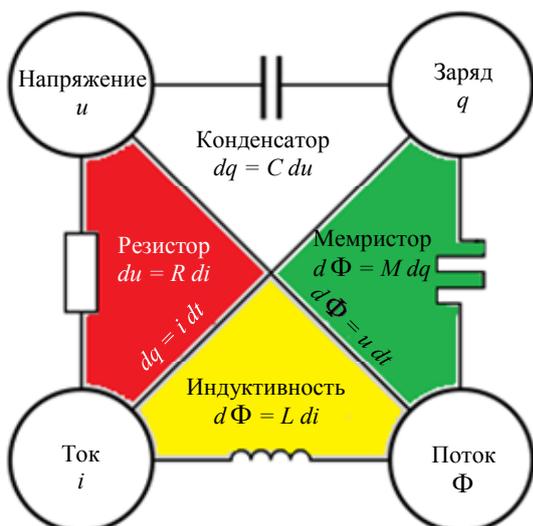


Рис. 1. Пассивные электрические элементы
 Fig. 1. Passive electrical elements

Как следует из анализа выражения (1), мемристор обладает памятью, поскольку его мемристанс $M(q)$ зависит от истории тока, протекающего через элемент. Мемристор «запоминает» сопротивление, которое устанавливается под действием приложенного напряжения и не меняется до его изменения. В зависимости от полярности приложенного напряжения, мемристанс $M(q)$ увеличивается или уменьшается. В 2008 г. группа исследователей под руководством Стэнли Вильямса – старшего научного сотрудника и директора-основателя лаборатории квантовой техники в компании Hewlett-Packard, описала на основе теории Л. Чуа электрические процессы в созданном ими переключаемом резисторе. Таким образом, 2008 г. считается годом появления физически созданного мемристора [1]–[4].

Известны многие достоинства мемристоров [1]–[4]. Отметим главные из них:

- длительное время хранения информации, теоретически – пока существует материал, из которого мемристор изготовлен;
- энергоэффективность (работает при малых напряжениях и потребляет мало энергии);
- масштабируемость (объединение элементов в мемристорные системы);
- малые размеры (наноразмеры), что способствует высокой интеграции мемристоров в системах;
- многоуровневость мемристанса и его программируемость (управляемость);
- высокая скорость переключения;
- совместимость с КМОП-технологией.

Указанные достоинства проявляются в разных сферах применения мемристоров: резистивная память (RRAM), нейрокомпьютерные системы, нанoeлектроника, сенсорные системы, робототехника, системы защиты информации, системы для радиочастотной автоматической идентификации объектов (radio frequency identification, RFID) и т. д. [5]–[10].

Технологии создания мемристоров разнообразны. В основе активно развиваемых технологий лежат физические процессы, отмеченные на рис. 2 [1], [11]–[15]:

- окислительно-восстановительные реакции (resistive switching, рис. 2, а),
- фазовое изменение состояния материалов (phase change, рис. 2, б),
- спиновые явления (spintronic, рис. 2, в),
- ферроэлектрический (сегнетоэлектрический) туннельный переход (ferroelectric tunnel junction, FTJ, рис. 2, г).

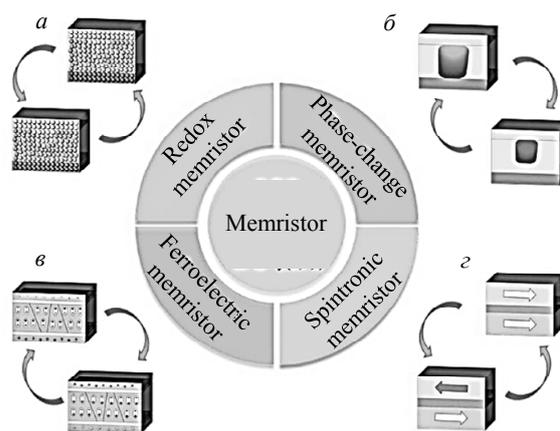


Рис. 2. Физические процессы в мемристорах:
 а – окислительно-восстановительные реакции;
 б – фазовое изменение состояния материалов;
 в – спиновые явления; г – сегнетоэлектрический туннельный переход
 Fig. 2. Physical processes in memristors: а – redox reactions; б – phase change of materials; в – spin phenomena; г – ferroelectric tunnel junction (FTJ)

Опишем упомянутые физические процессы и их влияние на свойства мемристоров. Представим результаты сравнительного анализа характеристик и свойств разных типов мемристоров.

Мемристоры на основе окислительно-восстановительных процессов. Примером мемристоров, построенных на окислительно-восстановительных процессах (reduction/oxidation, redox; redox-мемристор), служит элемент, созданный в лаборатории Hewlett-Packard в 2008 г. [4], [5], [14], [15]. Мемристор представлял собой двухслойную пленку толщиной 50 нм, расположенную между платиновыми электродами толщиной 5 нм каждый. Один слой пленки – диоксид титана TiO_2 , другой слой – легированный (обедненный кислородом, с кислородными вакансиями) диоксид титана TiO_{2-x} . Структура и электрическая схема замещения мемристора показаны на рис. 3, где w – ширина легированной области TiO_{2-x} , D – ширина пленки [4]. При $w = 0$ ширина области TiO_2 равна D и сопротивление пленки равно R_{off} . При $w = D$ ширина области TiO_{2-x} равна D и сопротивление пленки равно R_{on} . Отметим, что $R_{\text{on}} \ll R_{\text{off}}$. Под действием приложенного к электродам отрицательного напряжения в легированной области TiO_{2-x} положительно заряженные вакансии кислорода (ионы кислорода, ловушки для электронов) дрейфуют к отрицательно заряженному электроду через изолирующую область TiO_2 . В итоге легированная область TiO_{2-x} расширяется и сопротивление мемристора уменьшается. Под действием положительного напряжения положительно заряженные кислородные вакансии притягиваются к отрицательно заряженному электроду и удаляются от области TiO_2 . Легированная область TiO_{2-x} вследствие окислительного процесса сужается и сопротивление мемристора увеличивается.

В настоящее время для создания мемристоров применяются разные оксиды металлов, например VO_2 , Ni_2O_3 , ZrO_2 , HfO_2 [4], [5], [14], [15].

Математическая модель, описывающая линейные дрейфовые процессы и электрическую схему замещения на рис. 3, имеет вид [16], [17]

$$u(t) = \left\{ R_{\text{on}} \frac{w(t)}{D} + R_{\text{off}} \left[1 - \frac{w(t)}{D} \right] \right\} i(t),$$

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_{\text{v}} \frac{R_{\text{on}} i(t)}{D}, \quad (2)$$

где μ_{v} – константа, характеризующая среднюю подвижность ионов.

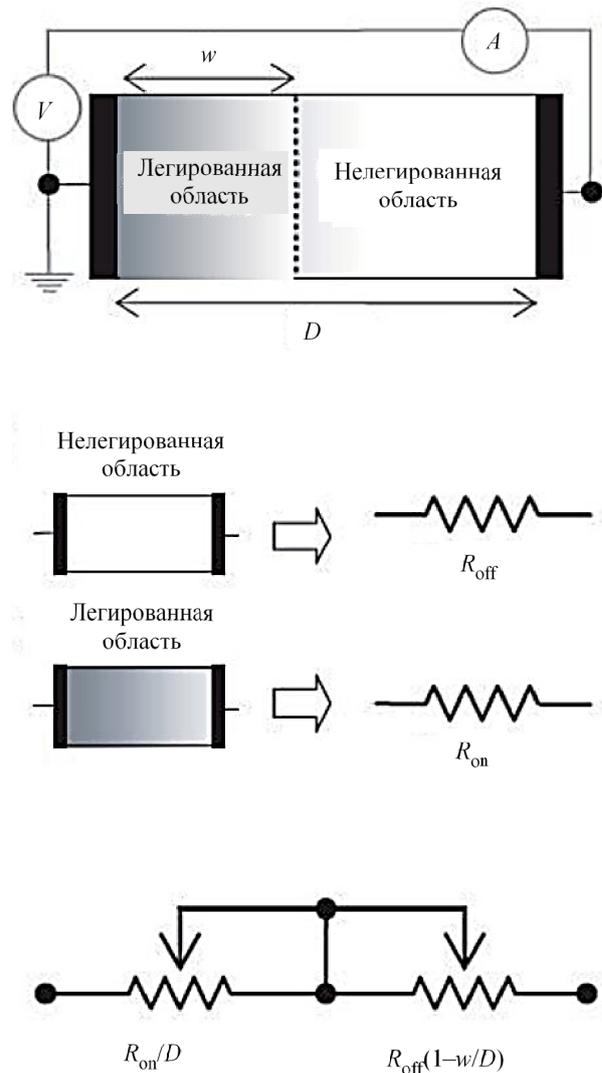


Рис. 3. Структура и электрическая схема замещения мемристора на базе окислительно-восстановительного процесса

Fig. 3. Structure and electrical scheme of a memristor based on the redox process

Интегрирование равенства (2) дает выражение

$$w(t) = \mu_{\text{v}} \frac{R_{\text{on}}}{D} q(t). \quad (3)$$

После подстановки (3) в (1) получим

$$u(t) = M(q)i(t),$$

где

$$M(q) = R_{\text{off}} + (R_{\text{on}} - R_{\text{off}}) \mu_{\text{v}} \frac{R_{\text{on}}}{D^2} q(t). \quad (4)$$

Из анализа выражения (4) следует:

- мемристанс $M(q)$ зависит от заряда $q(t)$;
- чем меньше D (толщина пленки), тем ярче проявляется эффект изменения сопротивления мемристора. Этот факт обуславливает наноразмерную структуру мемристоров.

Для повышения производительности устройств мемристоры объединяют в систему, называемую кроссбаром. Архитектура кроссбара показана на рис. 4 [4], [10]. Как видно из рисунка, кроссбар содержит ряды параллельно и перпендикулярно расположенных нанопроволок, на пересечении которых установлены мемристоры. Данная архитектура позволяет существенно уплотнить размещение мемристоров, а следовательно, уменьшить объем проектируемых устройств.

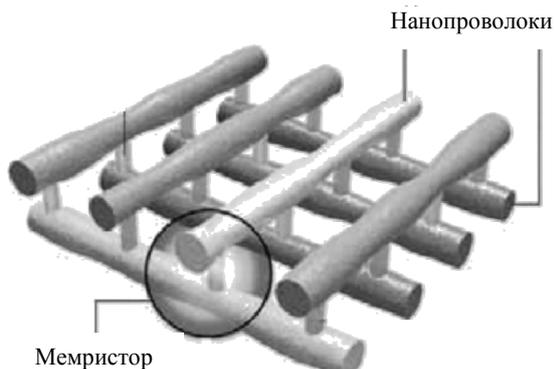


Рис. 4. Архитектура кроссбара
Fig. 4. Crossbar architecture

Многослойная кроссбарная архитектура лежит в основе мемристорных процессоров, создаваемых для вычислительной техники [10].

Мемристоры на основе фазоизменяемых материалов. Переключение мемристора может происходить вследствие изменения фазового состояния материала, применяемого для его производства. Такими фазоизменяемыми материалами являются халькогенидные пленки [1], [4]. Их состояние меняется с кристаллического на аморфное (когда отсутствует четкая кристаллическая структура и температура плавления) и наоборот. Аморфная структура вещества в основном образуется за счет быстрого охлаждения расплава.

Параметры фазовых переходов – это потребляемая мощность и температура пленки в этот момент. Распространенные халькогениды – тонкие пленки состава, например $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GeTe и AgInSbTe [1].

Для изменения состояния мемристоров применяются электрические импульсы разной амплитуды и длительности. Для перехода в высокоомное состояние (R_{off}) подается короткий импульс (например, менее 50 нс) с высокой амплитудой, в результате происходит плавление и быстрое остывание халькогенида с установлением стабильного аморфного состояния. Для перехода в низкоомное состояние (R_{on}) подается длительный импульс (например, 100 нс – 10 мкс) со средней амплитудой, в результате халькогенид нагревается до температуры кристаллизации и медленно охлаждается, т. е. происходит отжиг области переключения. В итоге материал кристаллизуется при температуре ниже температуры плавления и таким образом переходит из аморфного в кристаллическое состояние с низким сопротивлением [1], [4].

Переход между фазовыми состояниями иллюстрирует рис. 5. Слева показана аморфная фаза, справа – кристаллическая фаза. Переход SET означает уменьшение сопротивления от R_{off} до R_{on} , переход RESET – увеличение сопротивления от R_{on} до R_{off} .

Мемристоры на основе спиновых явлений. Спинтронные мемристоры основаны на эффекте магнитного туннельного перехода (magnetic tunnel junction, MTJ). Структура MTJ включает два магнитных слоя (например, ферромагнетики) и барьерный – сверхтонкий (несколько нанометров) диэлектрик, разделяющий магнитные слои

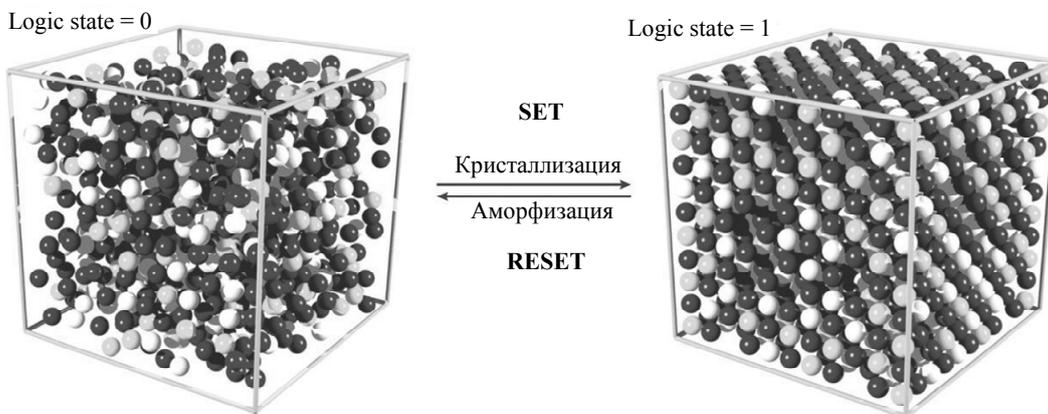


Рис. 5. Переход между фазовыми состояниями материала мемристора
Fig. 5. Transition between phase states of the memristor material

[18]. Структура спинтронного мемристора показана на рис. 6. Один магнитный слой (фиксированный, pinned layer) не меняет ориентацию своей намагниченности, другой (свободный, free layer) – меняет. В случае, если ориентации намагниченностей фиксированного и свободного магнитных слоев сонаправлены, мемристанс равен R_{on} (состояние логической 1). При противоположной ориентации намагниченностей слоев мемристанс равен R_{off} (состояние логического 0) [18].

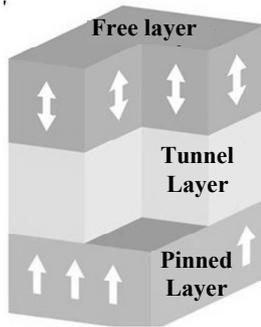


Рис. 6. Структура мемристора со спинтронным переходом
Fig. 6. Structure of a memristor with the spintronic transition

Ориентация намагниченности свободного слоя изменяется при пропускании спин-поляризованного тока через туннельный переход (эффект spin-transfer torque, STT). Для состояния «запись» пропускается большой спин-поляризованный ток с целью активации эффекта STT и переориентации намагниченности свободного слоя. Для состояния «чтения» пропускается слабый ток и по значению сопротивления определяется состояние мемристора [1], [18]. Таким образом, состояние спинтронного мемристора изменяется под влиянием эффекта STT.

Мемристоры на основе ферроэлектрического туннельного перехода. Структура ферроэлектрического туннельного перехода (ferroelectric tunnel junction, FTJ) в мемристоре содержит два металлических электрода, разделенных наноразмерным сегнетоэлектрическим изолятором. В тонком слое сегнетоэлектрика возникает эффект туннелирования, называемый туннельным электро-сопротивлением (tunnel electroresistance, TER) [1], [4], [10], [18]. Сегнетоэлектрики характеризуются спонтанной электрической поляризацией, которая изменяется под действием внешнего электрического поля и сохраняется при отсутствии поля. При действии электрического поля сегнетоэлектрические домены (макроскопические области с одинаковым направлением дипольных моментов)

объединяются в один (монодомен), поляризация которого сонаправлена с полярностью приложенного поля. При изменении полярности внешнего электрического поля поляризация монодомена меняется на противоположную. В итоге сегнетоэлектрик имеет две разные поляризации. При переключении поляризации сегнетоэлектрика в структуре FTJ происходит изменение высоты барьера для туннелирования электронов через слой сегнетоэлектрика и, следовательно, изменение сопротивления между R_{off} и R_{on} . Контролируя количество импульсов, их длительность и амплитуду, можно задавать значения сопротивлений между R_{off} и R_{on} . В рассматриваемом мемристоре запись информации выполняется при воздействии внешнего электрического поля с положительной или отрицательной полярностью, а чтение информации – только изменением туннельного тока.

Сравнительный анализ свойств разных типов мемристоров. В таблице представлены параметры характеристик и свойства мемристоров, создаваемых на основе описанных физических процессов [1].

При обработке больших объемов данных масштабируемость мемристорных устройств, т. е. повышение производительности за счет добавления элементов (расширяемости) устройства. Она оценивается по трем факторам: размеру мемристорного устройства (device dimension), размеру самого мемристора (feature size) и плотности размещения информации (density). Размер устройства – это площадь одной кроссбарной ячейки, которая определяется как квадрат размера элемента (F^2 или feature size²), умноженный на коэффициент (он равен 4 в таблице) [1]. Размер элемента измеряется в нанометрах и представляет собой ширину металлической линии, необходимой для создания одной ячейки. Плотность указывает на размер достижимой памяти. Как следует из таблицы, redox- и фазоизменяемые мемристоры – лучшие по масштабируемости, спинтронные и сегнетоэлектрические мемристоры (из-за большого размера внутреннего элемента) уступают по этому параметру.

Надежность мемристора – свойство, учитывающее три фактора: соотношение on/off (отношение R_{off}/R_{on}), число циклов переключения между состояниями on и off (endurance), время хранения информация (retention). Чем выше от-

Характеристики и свойства разных типов мемристоров
(данные получены при температуре ниже 85 °С)

Characteristics and properties of different types of memristors (data obtained at temperatures below 85 °C)

Характеристики и свойства	Система вычисления с мемристорами	Тип мемристора				
		Redox	Фазоизменяемый	Спинтронный	Ферроэлектрический	
Размер элемента (F), нм	фон Неймана	2	2.5	5	20	
Размер устройства		$4F^2$				
Плотность размещения информации, Гбайт		32	128	4	–	
Соотношение on/off		10^8	10^3	10	10^4	
Число циклов переключения (endurance)		10^{12}	10^{11}	10^{14}	10^9	
Время хранения информации (retention), лет		> 10				
Энергия на операцию, фДж		8	100	6	100	
Скорость программирования, пс		85	700	190	600	
Линейность		Нейроморфная	Низкая	Ниже среднего	Высокая	Ниже среднего
Стохастичность			Средняя	Средняя	Высокая	Низкая
Число уровней состояния	64		16	2	10	

ношение $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$, тем меньше ток утечки, меньше энергопотребление и, следовательно, надежнее устройство. Анализ таблицы показывает, что низкое отношение $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ наблюдается у спинтронного мемристора (из-за нарушения спиновых состояний в силу зависимости от температуры), более надежными считаются redox- и фазоизменяемые мемристоры, основанные на принципе миграции ионов [1].

Производительность мемристора оценивается двумя факторами: скоростью программирования (programming speed) и количеством энергии, затраченной на одну операцию (operation energy). Известно, что изменение фазового состояния мемристора требует большого тока для повышения температуры и длительного времени на кристаллизацию. Для изменения поляризации сегнетоэлектрика необходимы высокие напряжения, следовательно, высокой производительностью обладают redox- и спинтронные мемристоры (см. табл.).

На качество нейроморфных вычислений, выполняемых с помощью методов машинного обучения на базе нейронных сетей с мемристорами, влияют следующие факторы: симметричность, линейность (linearity), случайная изменчивость или стохастичность (stochasticity) петли гистерезиса передаточной характеристики (зависимости тока от напряжения) мемристора и уровневость (multi-level operation) мемристанса, предполага-

ющая множественность значений в диапазоне от R_{on} до R_{off} [1]. Симметрия передаточной характеристики мемристора рассматривается при действии на мемристор напряжения с разной полярностью. Симметрия кривых изменения мемристанса рассматривается при его увеличении и уменьшении. Мемристоры с асимметричной характеристикой нежелательны, поскольку сложны в применении [1]. Линейность – это линейная зависимость мемристанса от числа импульсов, программирующих его значения [1]. Стохастичность описывает уровень флуктуаций при отсутствии электрических воздействий. Чем меньше стохастичность, тем выше точность и производительность нейронных сетей в нейроморфных вычислениях [1]. Уровневость – это возможность получения не только состояний 0 или 1 мемристора, но и разных значений мемристанса в диапазоне от R_{on} до R_{off} . Чем выше уровневость, тем выше точность и производительность мемристора. Из таблицы видно, что уровневость redox-мемристора наибольшая, следовательно, он предпочтителен в нейроморфных системах. Спинтронный мемристор из-за малой уровневости наименее полезен в нейроморфных вычислениях [1].

Закключение. Появление мемристора – четвертого пассивного электрического элемента, стало стимулом для развития компонентной базы в электронике. КМОП-технология обладает существен-

ным недостатком: с уменьшением размера электронных элементов ослабевают изоляционные свойства внутренних диэлектриков (например, широко известного кремния), применяемых в электронике. Переход к мемристорной базе позволяет работать с нанозементами, которые в силу малых размеров обладают большим быстродействием и интегрируемостью в устройствах, меньшим энергопотреблением по сравнению с КМОП-технологией и не подвержены токам утечки, которые присутствуют в КМОП-устройствах.

Физические принципы создания мемристоров в действительности – это механизмы его резистивного переключения. Для расширения воз-

можностей резистивного переключения исследователи развивают технологии производства мемристоров и увеличивают разнообразие используемых материалов с целью роста уровняности мемристора за счет повышения отношения R_{off}/R_{on} , увеличения числа циклов переключения и поддержания стабильности параметров от цикла к циклу. Анализ рассмотренных физических принципов создания мемристоров показывает, что редокс-мемристоры, основанные на окислительно-восстановительных процессах с применением разных оксидов металлов, перспективны по многим показателям.

Список литературы

1. Im I. H., Kim S. J., Jang H. W. Memristive devices for new computing paradigms // *Advanced Intelligent System*. 2020. Vol. 2, no. 11. P. 2000105. doi: 10.1002/aisy.202000105.
2. Юсупов А., Сапаров Х. Ш., Атамуратов А. Э. Мемристор – основной элемент будущего искусственного интеллекта. Типы и основные характеристики (Обзор) // *Успехи прикладной физики*. 2020. Т. 8, № 4. С. 292–307.
3. 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. 305–321. doi: 24151/1561-5405-2017-22-4-305-321.
4. Никируй К. Э. Эффект резистивного переключения в нанокompозитных структурах на основе ниобата лития с гранулами CoFe: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2022. 136 с.
5. State of the art of metal oxide memristor devices / B. Mohammad, M. A. Jaoude, V. Kumar, D. M. Homouz, H. A. Nahla, M. Al-Qutayri, N. Christoforou // *Nanotechnology Reviews*. 2016. Vol. 5, no. 3. P. 311–329. doi: 10.1515/ntrev-2015-0029.
6. Memristor-based neural networks: a bridge from device to artificial Intelligence / Z. Cao, B. Sun, G. Zhou, S. Mao, S. Zhu, J. Zhang, C. Ke, Y. Zha, J. Shao // *Nanoscale Horizons*. 2023. No. 6. P. 716–745. doi: 10.1039/d2nh00536k.
7. Solovyeva E. Recurrent neural networks as approximators of nonlinear filters operators // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2018. Т. 1141. 012115. P. 1–10. doi: 10.1088/1742-6596/1141/1/012115.
8. Solovyeva E., Schulze S., Harchuk H. Behavioral modeling of memristor-based rectifier bridge // *Appl. Sci*. 2021. Vol. 11, no. 7. 2908. doi: 10.3390/app11072908.
9. Nonlinearity in memristors for neuromorphic dynamic systems / K. Yang, J. J. Yang, R. Huang, Y. Yang // *Small Sci*. 2021. Vol. 2, no. 1. 2100049. doi: 10.1002/smssc.202100049.
10. Handbook of memristor networks / L. Chua, G. Ch. Sirakoulis, A. Adamatzky. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland, 2019. 1368 p. doi: 10.1007/978-3-319-76375-0.
11. Nithya N., Paramasivam K. A Comprehensive study on the characteristics, complex materials and applications of memristor // 2020 6th Intern. Conf. on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). Coimbatore, India, 2020. 19568461. P. 171–176. doi: 10.1109/icacccs48705.2020.9074392.
12. Emerging materials for neuromorphic devices and systems / M.-K. Kim, Y. Park, I.-J. Kim, J.-S. Lee // *iScience*. 2020. Vol. 23, no. 12. 101846. doi: 10.1016/j.isci.2020.101846.
13. Isah A., Bilbault J.-M. Review on the basic circuit elements and memristor interpretation: analysis, technology and applications // *J. of Low Power Electronics and Appl*. 2022. 12(3). 44. doi: 10.3390/jlpea12030044.
14. Binary metal oxide-based resistive switching memory devices: a Status review / A. R. Patil, T. D. Dongale, R. K. Kamat, K. Y. Rajpure // *Materials Today Communications*. 2023. Vol. 34(2012). 105356. doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.105356.
15. Жалнин В. П., Ресалат Абу М. М., Мадида Д. Ш. Анализ мемристивных материалов и технологий с позиции долговечности и качества // *Тр. Межд. симпозиума «Надежность и качество»*. 2022. Т. 2. С. 3–8.
16. Dinavahi A., Yamamoto A., Harris H. R. Physical evidence of meminductance in a passive, two-terminal circuit element // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. P. 1817. doi: 10.1038/s41598-022-24914-y.
17. Solovyeva E. B., Inshakov Y. M., Ezerov K. S. Measurement of memristor characteristics at NI ELVIS workstation // 2022 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ELConRus). Moscow and St. Petersburg, 2022. P. 889–892. doi: 10.1109/ELConRus54750.2022.9755797.
18. In-memory computing with emerging memory devices: Status and outlook / P. Mannocci, M. Farronato, N. Lepri, L. Cattaneo, A. Glukhov, Z. Sun, D. Lelmini // *APL Machine Learning*. 2023. 1(1). 010902. doi: 10.1063/5.0136403.

Информация об авторах

Соловьева Елена Борисовна – д-р техн. наук, зав. кафедрой теоретических основ электротехники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», почетный работник сферы образования РФ.

E-mail: selenabl@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8204-6632>

Смирнов Владислав Александрович – студент гр. 1305 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vladsmirn289@gmail.com

References

1. Im I. H., Kim S. J., Jang H. W. Memristive devices for new computing paradigms // *Advanced Intelligent System*. 2020. Vol. 2, no. 11. P. 2000105. doi: 10.1002/aisy.202000105.
2. Jusupov A., Saparov H. Sh., Atamuratov A. Je. Memristor – osnovnoj jelement budushhego iskusstvennogo intellekta. Tipy i osnovnye karakteristiki (Obzor) // *Uspehi prikladnoj fiziki*. 2020. T. 8, № 4. S. 292–307. (In Russ.).
3. Belov A. N., Perevalov A. A., Shevjakov V. I. Memristornye struktury dlja mikro- i nanojelektroniki. *Fizika i tehnologija. Obzor // Izv. vuzov. Jelektronika*. 2017. T. 22, № 4. S. 305–321. doi: 24151/1561-5405-2017-22-4-305-321. (In Russ.).
4. Nikiruj K. Je. Jeffekt rezistivnogo perekljuchenija v nanokompozitnyh strukturah na osnove niobata litija s granulami CoFe: dis. ... kand. fiz.- mat. nauk. M., 2022. 136 s. (In Russ.).
5. State of the art of metal oxide memristor devices / B. Mohammad, M. A. Jaoude, V. Kumar, D. M. Homouz, H. A. Nahla, M. Al-Qutayri, N. Christoforou // *Nanotechnology Reviews*. 2016. Vol. 5, no. 3. P. 311–329. doi: 10.1515/ntrev-2015-0029.
6. Memristor-based neural networks: a bridge from device to artificial Intelligence / Z. Cao, B. Sun, G. Zhou, S. Mao, S. Zhu, J. Zhang, C. Ke, Y. Zha, J. Shao // *Nanoscale Horizons*. 2023. No 6. P. 716–745. doi: 10.1039/d2nh00536k.
7. Solovyeva E. Recurrent neural networks as approximators of nonlinear filters operators // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2018. T. 1141. 012115. P. 1–10. doi: 10.1088/1742-6596/1141/1/012115.
8. Solovyeva E., Schulze S., Harchuk H. Behavioral modeling of memristor-based rectifier bridge // *Appl. Sci*. 2021. Vol. 11, no. 7. 2908. doi: 10.3390/app11072908.
9. Nonlinearity in memristors for neuromorphic dynamic systems / K. Yang, J. J. Yang, R. Huang, Y. Yang // *Small Sci*. 2021. Vol. 2, no. 1. 2100049. doi: 10.1002/smssc.202100049.
10. Handbook of memristor networks / L. Chua, G. Ch. Sirakoulis, A. Adamatzky. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland, 2019. 1368 p. doi: 10.1007/978-3-319-76375-0.
11. Nithya N., Paramasivam K. A Comprehensive study on the characteristics, complex materials and applications of memristor // 2020 6th Intern. Conf. on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). Coimbatore, India, 2020. 19568461. P. 171–176. doi: 10.1109/icaccs48705.2020.9074392.
12. Emerging materials for neuromorphic devices and systems / M.-K. Kim, Y. Park, I.-J. Kim, J.-S. Lee // *iScience*. 2020. Vol. 23, no. 12. 101846. doi: 10.1016/j.isci.2020.101846.
13. Isah A., Bilbault J.-M. Review on the basic circuit elements and memristor interpretation: analysis, technology and applications // *J. of Low Power Electronics and Appl*. 2022. 12(3). 44. doi: 10.3390/jlpea12030044.
14. Binary metal oxide-based resistive switching memory devices: a Status review / A. R. Patil, T. D. Dongale, R. K. Kamat, K. Y. Rajpure // *Materials Today Communications*. 2023. Vol. 34(2012). 105356. doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.105356.
15. Zhalnin V. P., Resalat Abu M. M., Madida D. Sh. Analiz memristivnyh materialov i tehnologij s pozicii dolgovechnosti i kachestva // *Tr. Mezhd. simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. 2022. T. 2. S. 3–8. (In Russ.).
16. Dinavahi A., Yamamoto A., Harris H. R. Physical evidence of meminductance in a passive, two-terminal circuit element // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. P. 1817. doi: 10.1038/s41598-022-24914-y.
17. Solovyeva E. B., Inshakov Y. M., Ezerov K. S. Measurement of memristor characteristics at NI ELVIS workstation // 2022 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). Moscow and St. Petersburg, Russia, 2022. P. 889–892. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755797.
18. In-memory computing with emerging memory devices: Status and outlook / P. Mannocci, M. Farronato, N. Lepri, L. Cattaneo, A. Glukhov, Z. Sun, D. Lelmini // *APL Machine Learning*. 2023. 1(1). 010902. doi: 10.1063/5.0136403.

Information about the authors

Elena B. Solovyeva – Dr Sci. (Eng.), Head of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University. Honorary Worker of Education of the Russian Federation.

E-mail: selenabl@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8204-6632>

Vladislav A. Smirnov – student gr. 1305 of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: vladsmirn289@gmail.com

Статья поступила в редакцию 09.11.2023; принята к публикации после рецензирования 05.12.2023; опубликована онлайн 30.01.2024.

Submitted 09.11.2023; accepted 05.12.2023; published online 30.01.2024.
