

УДК 535.8:620.3

МЕМРИСТОРЫ: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ПРИМЕНЕНИЕ

Заяц И.Г., Отливщиков Ф.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹,
г. Минск, Республика Беларусь

Горячун Н.В. – старший преподаватель

Аннотация. Мемристоры – это перспективные элементы микро- и нанoeлектроники. Они одновременно выполняют функции памяти и обработки информации. Работа основана на изменении сопротивления в зависимости от количества прошедшего электрического заряда. В основе физических механизмов лежит движение ионов и дефектов кристаллической решётки, например кислородных вакансий, в активном слое под действием электрического поля. Мемристоры энергонезависимы и обеспечивают высокую плотность хранения. Кроме того, они способны принимать множество промежуточных состояний. Поэтому их рассматривают как ключевые элементы для нейроморфных вычислений, систем искусственного интеллекта и архитектур обработки данных в памяти.

Ключевые слова: мемристор, мемристивные системы, нейроморфные вычисления, резистивная память, нанотехнологии.

Введение. В классической архитектуре компьютеров процессор и память разделены. Это создает при работе нейросетей огромные задержки и энергозатраты. Решением выступает мемристор схожий по работе с синапсами мозга. Это пассивный элемент, объединяющий хранение и обработку данных, который является аналогом структуры, через которую наши нейроны передают сигналы друг другу. Его сопротивление зависит от заряда, прошедшего через него. Мемристоры открывают новые горизонты в электронике за счёт сочетания памяти и обработки в одном устройстве. Они реализуют идею «четвёртого» пассивного элемента схем, предсказанного Л. Чуа в 1971 году, и находят практическую реализацию в виде тонкопленочных резистивных устройств.

Основная часть. Математическая суть мемристора Л.Чуа состоит в связи потока Φ и заряда q : $d\Phi = M(q) dq$. Уравнение закона Ома для него выглядит как $v = M(q)i$, где $M(q)$ — мемрезистанс, то есть сопротивление, зависящее от истории тока. Технические преимущества таких элементов включают энергонезависимость, энергоэффективность, высокую плотность и способность принимать множество значений. Обработка информации в одном месте делает их идеальными для нейросетей.

Мемристивность $M(q)$ — это уникальное свойство, которое определяет мгновенное сопротивление элемента в зависимости от всего накопленного заряда, прошедшего через него ранее. Чтобы реализовать этот эффект на практике, используется особая физическая структура, например, классическая наноразмерная гетероструктура Pt/TiO₂/TiO_{2-x}/Pt. В её основе лежит активный оксидный слой, надёжно зажатый между двумя металлическими электродами (рисунок 1). Главным «действующим лицом» в этом слое выступает кислородная вакансия — точечный дефект кристаллической решётки, который возникает при малейшем отклонении от идеальной стехиометрии материала. В слое диоксида титана эти микроскопические пустоты ведут себя как классические донорные примеси: они отдают электроны и радикально повышают концентрацию свободных носителей заряда, локально превращая диэлектрик в проводник.

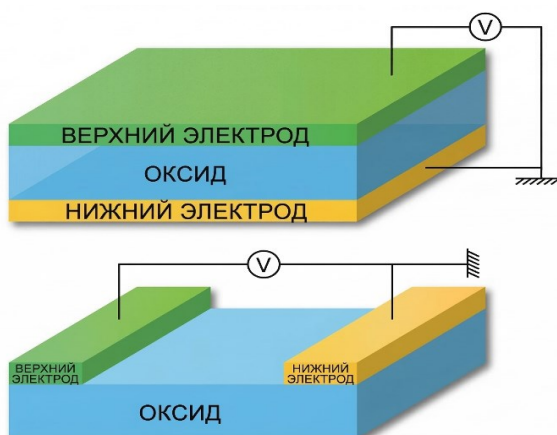


Рисунок 1 – Схематическая структура тонкопленочного резистивного мемристора

Механизм переключения заключается в том, что под действием внешнего электрического поля происходит электромиграция вакансий. В состоянии низкого сопротивления вакансии смещаются в чи-

стый слой TiO_2 , формируя проводящие каналы или расширяя область проводимости. В состоянии высокого сопротивления обратный дрейф вакансий восстанавливает диэлектрический барьер. Низкая подвижность ионов в твердом теле «замораживает» память, обеспечивая энергонезависимое хранение состояния (рисунок 2).

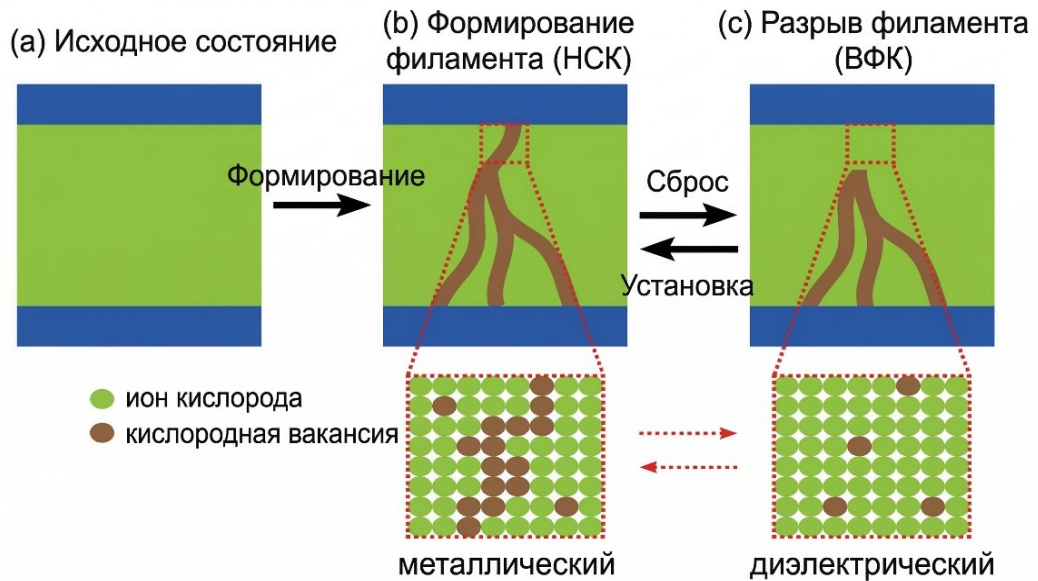


Рисунок 2 – Процесс формирования и разрушения проводящих нитей в мемристоре

Для интеграции мемристоров в вычислительные системы используются решетчатые структуры пересекающихся проводников. В такой архитектуре мемристоры находятся в точках пересечения горизонтальных и вертикальных линий, что позволяет выполнять матричные операции прямо на аппаратном уровне. Благодаря законам Кирхгофа и Ома токи суммируются параллельно, что исключает задержки, возникающие при передаче данных из оперативной памяти в процессор. Это особенно эффективно для работы глубоких нейронных сетей.

Важным этапом развития технологии стало создание адаптивных систем, которые способны к самообучению на месте. В отличие от классических моделей, где веса рассчитываются на суперкомпьютерах и затем копируются в чип, мемристорные массивы позволяют корректировать проводимость ячеек непосредственно в процессе работы устройства, имитируя механизмы синапсов. Это достигается за счет использования эффектов пластичности, зависящей от времени прихода импульсов, где изменение веса синапса зависит от разницы во времени между импульсами на входном и выходном электродах. Такие системы демонстрируют высокую устойчивость к сбоям и способны функционировать в условиях неопределенности, что делает их незаменимыми для автономных роботов и сенсорных сетей граничных вычислений.

Также, помимо классических оксидных вариантов, существуют и альтернативные физические реализации мемристоров. В устройствах на основе электрохимической металлизации активным слоем выступает полимер с внедренными наночастицами металлов, таких как серебро (Ag) или медь (Cu). Под действием электрического поля эти ионы мигрируют, выстраивая сквозь диэлектрик устойчивые токопроводящие мостики.

Другой подход опирается на эффект Мотта и фазовые переходы: здесь переключение происходит благодаря резкому скачку состояния материала (переход от диэлектрика к металлу). Это позволяет устройству генерировать короткие импульсы, поразительно схожие со спайками биологических нейронов. Передовые разработки также задействуют 2D-материалы для филигранного управления проводимостью через атомную перестройку кристаллической решетки, а также методы оптической коммутации, где состояния переключаются светом. Независимо от конкретной архитектуры, механизм памяти всегда сводится к «замораживанию» распределения ионов и заряженных дефектов после снятия напряжения. Именно этот принцип надежно гарантирует строгую энергонезависимость устройства.

Для моделирования мемристорных структур применяются комплексные подходы, варьирующиеся от анализа фундаментальных физических явлений, таких как дрейф ионов, диффузия и тепловые эффекты, до построения абстрактно-математических моделей, использующих системы уравнений и аналитические решения для описания динамики внутренних состояний и вольт-амперных характеристик. Симуляционные модели позволяют прогнозировать функциональное поведение элементов в различных эксплуатационных условиях с учетом их электрофизических параметров, при этом анализ ВАХ выявляет характерную особенность: при воздействии высокочастотных сигналов инерционность внутренних процессов препятствует изменению состояния устройства, в результате чего устройство ведёт себя почти как линейный резистор.

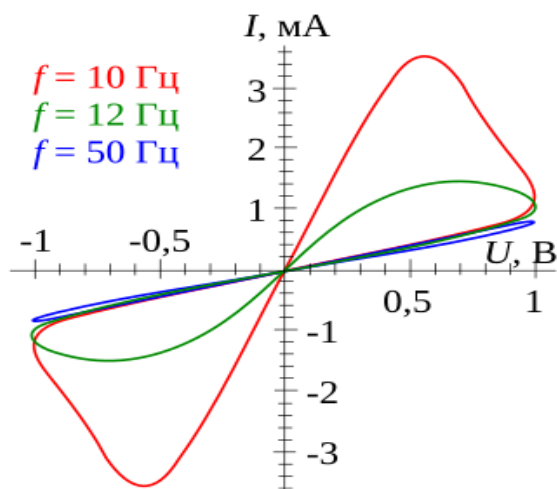


Рисунок 3 – ВАХ идеального мемристора

Важнейшей физической моделью является модель линейного дрейфа, предложенная для TiO₂-мемристора: она описывает равномерное смещение границы между проводящей и непроводящей областями материала при напряжении. Мемристор Чуа не был реализован полностью, поэтому большинство современных устройств относятся к более общей категории мемристивных систем.

Инновации последних лет 2020–2024 включают создание гибридных светочувствительных сенсоров на базе перовскитов, имитирующих сетчатку глаза, а также ионно-жидкостных мемристоров. Использование материалов на базе NbO₂, который позволяет создавать биосовместимые интерфейсы для связи с живыми нейронами. В рамках нейроморфных проектов (таких как «Мозг на чипе» от MIT) созданы прототипы, распознающие образы с минимальными энергозатратами. Мемристоры позволяют переносить вычисления в память и также создавать адаптивную электронику для умных датчиков. Остаются лишь технические вызовы: необходимость повышения надежности и стабильности переключений за счет устранения дефектов и изменчивости характеристик материалов.

Заключение. Мемристоры открывают принципиально новые горизонты в микро- и нанoeлектронике, бесшовно сочетая энергонезависимую память и обработку информации в одном физическом устройстве. За последние годы наука добилась глубокого понимания ключевых физических механизмов работы этих устройств — от дрейфа ионов до сложных фазовых переходов. Эти компоненты обещают существенно снизить энергопотребление вычислительных систем, особенно в задачах искусственного интеллекта, где они выступают в роли аппаратных «синапсов». Несмотря на то, что перед индустрией ещё стоят серьёзные вызовы, требующие улучшения повторяемости переключений и борьбы с шумовыми дефектами материалов, уже очевидно, что мемристорные системы формируют будущее адаптивной электроники и архитектур вычислений «в памяти».

Список использованных источников:

1. Chua L. O. Memristor — The Missing Circuit Element // *IEEE Transactions on Circuit Theory*. — 1971. — Vol. CT-18, No. 5. — P. 507–519. (Фундаментальная база из раздела 1 и 2).
2. Zidan M. A., Strachan J. P., Lu W. D. The future of electronics based on memristive systems // *Nature Electronics*. — 2018. — Vol. 1. — P. 22–29. (Обоснование перспектив и архитектур из разделов 5 и 6).
3. Ерохин В. В. Полимерные мемристоры // *Физика и техника полупроводников*. — 2020. (Источник для раздела о полимерных и электрохимических мемристорах).
4. Что такое мемристор: принцип действия, модели, применение. РБК Тренды. [Электронный ресурс] URL: <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/> (Общий обзорный материал для ВАХ и мод)

UDC 535.8:620.3

MEMRISTORS: PHYSICAL PRINCIPLES OF OPERATION AND APPLICATIONS

Zayats I.G., Otdelivshchikov F.V., students

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus*

Goryachun N.V. – senior lecturer

Annotation. Memristors are promising components in micro- and nanoelectronics. They simultaneously perform the functions of memory and information processing. Their operation is based on a change in resistance depending on the amount of electric charge that has passed through. The physical mechanisms are based on the movement of ions and defects in the crystal lattice, such as oxygen vacancies, in the active layer under the influence of an electric field. Memristors are non-volatile and provide high storage density. In addition, they are capable of assuming a multitude of intermediate states. Therefore, they are considered key elements for neuromorphic computing, artificial intelligence systems, and in-memory data processing architectures.

Keywords: memristor, memristic systems, neuromorphic computing, resistive memory, nanotechnology.