

## 1.23. МЕМРИСТОРЫ

**Цель лекции:** ознакомление с новым типом пассивных электронных элементов — мемристором.

### 1.23.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕМРИСТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Мемри́стор — пассивный электронный элемент, двухполюсник, способный изменять свое сопротивление в зависимости от протекшего через него электрического заряда.

В настоящее время технологии КМОП-структур получили значительное развитие. Вместе с тем идет поиск и разработка электронных компонентов, основанных на новых физических принципах работы. Научно-исследовательские работы по искусственному интеллекту как направление микроэлектроники очень быстро развиваются. Появляется все большее количество информации, для хранения которой необходимы ячейки памяти. Стандартные компьютеры уже не могут удовлетворить возрастающие потребности. В 2008 г. Компанией HP был предложен мемристор — новый элемент для хранения и обработки информации, который, по-видимому, способен решить обозначенные выше проблемы.

Конструкция мемристора напоминает конструкцию конденсатора. Между двух электродов помещен функциональный слой нанометровой толщины.

Мемристор изменяет свою проводимость в зависимости от протекающего через него тока. Перспективные устройства на его основе будут быстрее и более емкими, именно эти характеристики смогут сделать компьютеры недорогими и малых габаритов. Основное свойство мемристора — сохранение информации. Сопротивление мемристора сохраняется при отключении тока. Однако вследствие отсутствия полноценной теории работы мемристора учеными всего мира осуществляется экспериментальный поиск наилучшей архитектуры мемристора с наилучшими параметрами. Существенной проблемой является подбор материалов для мемристоров, обладающих определенными свойствами. Рассмотрим несколько видов мемристоров, изготовленных из разных материалов с применением разных технологий, требования, предъявляемые к каждому из них, и сравним характеристики этих мемристоров.

Функция мемристора заключается в запоминании своего сопротивления, значение которого зависит от его последнего состояния в данный момент. Когда напряжение на мемристоре оказывается равным нулю, его сопротивление останется таким, каким оно было в момент отключения напряжения, поэтому его признают запоминающим элементом. Этот пассивный элемент обладает двумя выводами. Единица сопротивления мемристора Ом и зависит от прошедшего через него заряда  $q$ .

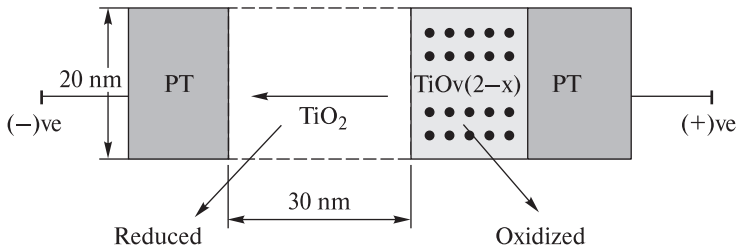
Основные положительные черты мемристора:

- в выключенном состоянии не потребляет питания, обладает большой скоростью переключения и памятью;
- имеет простую структуру, напоминающую конденсатор и только два вывода;
- имеет широкую область применения: энергонезависимая память, реконфигурируемая электроника и даже нейроморфные системы;
- возможность объединения мемристоров в кроссбар-архитектуре и создания матриц памяти с произвольным доступом;
- технология создания мемристора хорошо komponуется с отработанной технологией создания КМОП-структур.

К недостаткам мемристора относятся:

- как сравнительно новый элемент, мемристор технически еще далек от совершенства, быстродействие и стабильность его характеристик находятся пока на недостаточно высоком уровне;
- требуются дополнительные исследования для доведения мемристора до коммерчески успешного изделия.

**Мемристоры на основе оксидов металлов.** Среди многих оксидов металлов для резистивного слоя мемристоров изучают такие материалы, как  $TiO_x$ ,  $HfO_x$ ,  $AlO_x$ ,  $TaO_x$  и  $ZrO_x$ . Одним из первых был предложен мемристор на основе диоксида титана  $TiO_2$ , который может изменять свое сопротивление при перемещении вакансий кислорода под действием внешнего напряжения (рис. 1.122).



**Рис. 1.122.** Схема мемристора на базе оксида титана (*Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. The missing memristor found // Nature letters. 2008. Vol. 453. Pp. 80–83*)

Резистивный материал мемристора  $TiO_2$ , предложенного фирмой HP, расположен между двумя платиновыми электродами. При подаче напряжения на платиновые электроды кислородные вакансии, содержащиеся в диоксиде титана, будут перемещаться вправо или влево в зависимости от направления тока, при этом изменяется сопротивление резистивного слоя. К этой же группе можно отнести мемристоры на основе манганита  $MnO(OH)$ . Мемристор на основе манганита обладает повышенной стабильностью и долговечностью работы.

**Спиновые мемристоры.** Эти мемристоры зависят от характеристик спина электрона, благодаря чему может проявляться гистерезисное поведение. Принцип действия таких мемристоров основан на том, что при прохожде-

нии тока через тонкую пленку, находящуюся под действием магнитного поля одного из конструктивных элементов мемристора, спины электронов, составляющих ток, будут ориентированы вдоль магнитных силовых линий. Это явление известно как спин-поляризация, и сопротивление прохождению тока будет минимальным. Если магнитное поле изменит свое направление на противоположное, то сопротивление току резко возрастет. Данный физический механизм может быть непосредственно использован для построения спинтронного мемристора.

**Сегнетоэлектрические мемристоры.** Такой мемристор состоит из сегнетоэлектрической пленки нанометровой толщины, находящейся между двумя металлическими электродами. В нанометровой структуре присутствует переключаемое гистерезисное и энергонезависимое резистивное переключение, которое аналогично мемристивному характеру классического мемристора. Наиболее известная в настоящее время сегнетоэлектрическая архитектура мемристора включает в себя пленку  $\text{BaTiO}_3$ , нанесенную на слой  $\text{La}_x\text{Sr}_y\text{MnO}_3$ , которая находится между двумя металлическими электродами. Резистивное переключение сегнетоэлектрического мемристора рассматривается как результат изменения поляризации диэлектрика в сегнетоэлектриках. Следует отметить, что для тонкой сегнетоэлектрической пленки, которая, однако, может поддерживать свою сегнетоэлектричность, поверхностный заряд в сегнетоэлектрике не полностью экранируется электродами, что позволяет создать ненулевое деполаризующее электрическое поле в сегнетоэлектрическом слое. В результате в районе одного из электродов могут накапливаться кислородные вакансии на границе раздела оксид металла — сегнетоэлектрик. Благодаря этому высота энергетического барьера и сопротивление «включенного» состояния могут быть эффективно уменьшены. Отрицательное смещение индуцирует диссипацию накопленных зарядов на границе раздела и (или) восстановление оксида металла на границе раздела, переводя гетероструктуру в высокоомное состояние.

**Резонансно-туннельные диодные мемристоры.** При исследовании квантово-размерных резонансно-туннельных диодов было обнаружено, что они обладают свойствами мемристора. Резонансно-туннельный диод может быть изготовлен из различных полупроводниковых материалов и иметь различные резонансные туннельные структуры, такие как двойной и тройной барьеры, квантовая проволока и квантовая точка. Архитектура такого резонансно-туннельного диодного мемристора имеет вид двух контактов из сильно легированных полупроводниковых материалов с узкой запрещенной зоной. Такая архитектура образует область эмиттера, квантовую яму между двумя барьерами и область коллектора. Особенностью данной конструкции является то, что квантовая яма изготовлена с использованием полупроводника с небольшой запрещенной зоной, в то время как барьеры выполнены из материалов с большой запрещенной зоной. Когда на устройство подается напряжение, электроны, ранее захваченные в эмиттере, получают энергию от внешнего электрического поля и поэтому могут туннелировать через квантовую яму к коллектору, что приводит к увеличению тока. Экспериментально было уста-

новлено, что такое устройство имеет ВАХ в виде петли гистерезиса, аналогичной классическому мемристору. Однако никаких существенных достижений в этой области пока не достигнуто.

**Мемристоры на основе халькогенидов.** Халькогениды — бинарные химические соединения халькогенов (элементов шестой группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева) с металлами. Под действием электрического тока они могут изменять свое фазовое состояние — переходить из поликристаллической фазы в аморфную и обратно, демонстрируя при этом большое различие между значениями электрического сопротивления. Механизмом фазового перехода в халькогенидах является нагрев и охлаждение, переход происходит достаточно быстро, что позволяет использовать их в качестве диэлектрика в составе трехслойной структуры мемристора. Программирование такого элемента памяти происходит путем подачи электрического импульса соответствующей амплитуды и длительности.

Принципиальная пригодность конструкции на основе халькогенида доказана. Однако ей присущи недостатки, свойственные системам, использующим нагрев для процесса перехода: многократный нагрев приводит к изменению физических свойств из-за разрушения внутренней структуры вещества. Поэтому наиболее перспективными выглядят системы на основе оксидов металлов, работающие за счет перемещения вакансий кислорода в нанометровом диэлектрическом слое оксидов металлов при приложении электрического поля.

**Органические мемристоры.** Одним из первых и наиболее изученных органических мемристоров был прибор на основе структуры, состоящей из слоя полианилина в контакте с твердым электролитом на основе полиэтиленоксида. Мемристивная функция полимерного устройства достигается путем переключения электропроводности полимерной пленки между высокорезистивным (также называемым восстановленным) состоянием и высокопроводящим (также называемым окисленным) состоянием посредством хорошо известной окислительно-восстановительной реакции. Тонкий проводящий полимерный слой — полианилин (ПАНИ) наносят на изолирующую твердую подложку с двумя предварительно сформированными металлическими электродами. Дополнительная пленка полиэтиленоксида (ПЭО), легированного перхлоридом лития, образуется на центральной области слоя ПАНИ таким образом, чтобы обеспечить ионный поток в слой ПАНИ (и из него) на границе раздела. В основной области ПАНИ–ПЭО происходит окислительно-восстановительная реакция, и поэтому она называется активной зоной. Кроме того, поскольку для окислительно-восстановительной реакции требуется опорный потенциал, используют третий электрод — серебряную проволоку, присоединяемую к слою ПЭО, которая является электродом сравнения.

Известно, что в качестве резистивного слоя, расположенного между двумя электродами, был использован фиброин из коконов шелкопряда *Bombyx mori*. Механизм переключения сопротивления связан с образованием и разрушением проводящих филаментов в слое фиброина, поэтому в данной конструкции оказалось достаточно только двух электродов.

### 1.23.2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МЕМРИСТОРА

Важной особенностью мемристора является его ВАХ в виде петли гистерезиса (рис. 1.123).

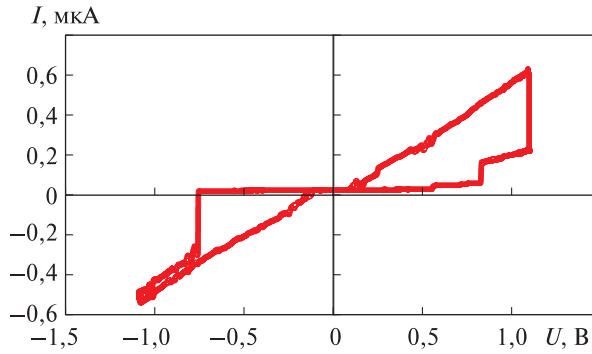


Рис. 1.123. Вольт-амперная характеристика мемристора в виде петли гистерезиса

Наличие петли гистерезиса обуславливает свойство этого элемента хранить информацию.

Следующее свойство мемристора состоит в зависимости площади петли гистерезиса от частоты переключения сигнала. При увеличении частоты площадь петли уменьшается и превращается на ВАХ в прямую линию, как у обычного резистора. Таким образом, на относительно высоких частотах мемристор ведет себя как обычный резистор.

Для мемристоров на основе оксидов металлов изменение сопротивления мемристора  $M(q)$  в зависимости от прошедшего через него заряда  $q(t)$  за время  $t$  описывается выражением

$$M(q) = R_{\text{off}} \left( 1 - \frac{\mu_v R_{\text{on}}}{D} q(t) \right),$$

где  $R_{\text{off}}$  — высокое сопротивление мемристора;  $R_{\text{on}}$  — низкое сопротивление мемристора;  $\mu_v$  — средняя подвижность ионов в резистивном слое;  $D$  — толщина резистивного слоя.

Из приведенного выражения следует, что заряд, проходящий через мемристор, не накапливается в нем, как в конденсаторе, а изменяет сопротивление устройства. Поэтому мемристор не является элементом, накапливающим энергию, и по сути, это нелинейный резистор. В табл. 1.3 представлены некоторые сравнительные характеристики ряда мемристоров.

Как следует из табл. 1.3, по параметру  $R_{\text{on}}/R_{\text{off}}$  наиболее высокие показатели у мемристоров на основе оксидов металлов, что обуславливает возможность их использования для создания устройств памяти, имеющих не только два состояния «0» и «1», а несколько. Таким образом, теоретически одна

Таблица 1.3

Сравнительные характеристики некоторых мемристоров<sup>1–5</sup>

Тип мемристора	Отношение сопротивлений $R_{on}/R_{off}$	Время переключения, нс	Максимальное число циклов переключения
На основе оксидов металлов	2000	10	$10^9$
Полимерные	100	25	$10^8$
Сегнетоэлектрические	300	10	$10^{14}$
Спинтронные	5	10	$10^{16}$
Халькогенидные	>1000	50	$10^8$

мемристорная ячейка памяти может хранить в разы больше информации на той же площади, что и современные ячейки памяти. Мемристоры на основе оксидов металлов также имеют наименьшее время переключения из состояния высокого сопротивления в низкое. Однако такие мемристоры выдерживают не более  $10^9$  циклов переключения, что недостаточно. Поэтому необходимо проводить исследования по подбору материалов и архитектуры таких мемристоров.

Полимерные мемристоры в настоящее время имеют не самые лучшие характеристики, и требуется проведение многих исследований в этой области.

Сегнетоэлектрические мемристоры обладают хорошими характеристиками, а спинтронные мемристоры — одними из лучших для создания ячеек памяти, что обуславливает их применение.

Быстродействие халькогенидных мемристоров не очень высокое, тем не менее они также подходят для создания ячеек памяти, не требующих высокого быстродействия.

Поскольку мемристоры на основе оксидов металлов отличаются наиболее высокими показателями по ряду параметров, а технология их изготовления достаточно хорошо отработана, проведем анализ материалов, используемых для их изготовления.

<sup>1</sup> Zhalnin V.P., Vlasov A.I., Gudoshnikov I.V., Kadyr A.T., Shakhnov V.A. Market for memristors and data mining memory structures for promising smart systems // Entrepreneurship and Sustainability Issues. 2020. Vol. 8. No. 2. Pp. 98–115.

<sup>2</sup> Zhalnin V.P., Shakhnov V.A., Vlasov A.I. Methods for improvement of the consistency and durability of the inorganic memristor structures // International Journal of Nanotechnology. 2019. Vol. 16. No. 1–3. Pp. 187–195.

<sup>3</sup> Zhalnin V.P., Vlasov A.I., Rasuk A.A., Kosyanov O.V. Composite nano-materials for implementation of promising memristive structures // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 910 KEM. Pp. 703–712.

<sup>4</sup> Ситников А.В. Прикладная электроника: учебник. А.В. Ситников, И.А. Ситников. М.: Инфра-М, 2018. 576 с.

<sup>5</sup> Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. The missing memristor found // Nature letters, 2008. Vol. 453. Pp. 80–83.

### 1.23.3. АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ МЕМРИСТИВНЫХ СТРУКТУР

В зависимости от материала свойства мемристоров могут отличаться. К основным свойствам мемристоров относят рабочие токи и напряжения, размеры устройств, термостабильность, запас шума, свойство изменения фазы и др. Поскольку эти свойства отличаются, области применения мемристоров могут быть различными. В табл. 1.4 представлены рабочие параметры некоторых мемристоров на основе оксидов металлов.

Как следует из табл. 1.4, наиболее энергоэффективными являются мемристоры на основе диоксида кремния, оксида никеля и оксида железа. Мемристоры на основе оксида железа больше подходят для изготовления аналоговых устройств вследствие довольно плавного изменения сопротивления. Мемристоры на основе оксида никеля больше подходят для цифровых устройств.

Диапазон применения мемристоров очень широк благодаря высокой масштабируемости и уникальным физико-химическим возможностям. Существует множество материалов, проявляющих мемристинный эффект: оксиды, халькогениды, полимеры, сегнетоэлектрики и т. п.

Таблица 1.4

Рабочие параметры некоторых мемристоров на основе оксидов металлов

Тип резистивного слоя	Рабочее напряжение, В	Рабочий ток, мА	Мощность, мкВт	Особенности свойств
Диоксид титана $\text{TiO}_2$	2	0,2	400	Высокое быстродействие, низкий уровень шума, $R_{\text{on}}/R_{\text{off}} \sim 2000$
Диоксид кремния $\text{SiO}_2$	2	0,00025	0,5	$R_{\text{on}}/R_{\text{off}} \sim 10^5$
Оксид железа $\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,8	10	18	Характерно плавное изменение сопротивления. Больше подходит для аналоговых устройств
Оксид никеля $\text{NiO}$	1,5	5	7,5	Больше подходит для цифровых устройств вследствие особенностей переключения
Оксид ванадия $\text{VO}_2$	50	6	300	$R_{\text{on}}/R_{\text{off}} \sim 10^4$ . Подходит для устройств с многоуровневой логикой
Оксид графита (графена) $\text{CO}$	6	100	600	Высокая термостабильность

Наиболее подходящими областями для применения мемристоров являются создание ячеек памяти, синапсов, нейроморфных архитектур, реконфигурируемая логика и многие другие. Однако технология мемристинных устройств является новой и создает множество проблем, таких как поиск нового материала, проблемы совместимости аналоговых и цифровых свойств мемристора и т. п. Ряд мемристоров обладает свойством обеспечивать способность хранения многоуровневой информации в одной ячейке, что позво-

лит изготавливать устройства хранения информации более компактными. Кроме того, мемристоры могут одновременно иметь аналоговое поведение, подобное синапсу мозга. Из этого следует, что мемристоры можно использовать как для цифровых, так и для аналоговых устройств, а также для создания нейроморфных систем.

Свойства мемристоров — рабочие токи и напряжения, размеры устройств, термостабильность, запас шума, свойство изменения фазы, масштабируемость — зависят от материала, из которого изготовлен компонент. Использование таких элементов памяти, как мемристор, является перспективным для применения в устройствах хранения и обработки информации. Мемристоры на базе оксидов металлов являются в настоящее время наиболее перспективными для первоочередного внедрения в промышленность, поскольку технология их изготовления хорошо отработана и они обладают приемлемыми характеристиками.

## Тесты к лекции 1.23

### 1. *Что такое мемристор?*

а) пассивный электронный элемент, двухполюсник, способный изменять свое сопротивление в зависимости от протекшего через него электрического заряда;

б) разновидность операционного усилителя;

в) разновидность аналого-цифрового преобразователя.

2. *Какой параметр мемристора изменяется при прохождении через него тока?*

а) проводимость;

б) степень поляризации;

в) индуктивность.

### 3. *В чем заключается основная функция мемристора?*

а) в запоминании своего сопротивления;

б) в изменении индуктивности;

в) в изменении степени поляризации.

4. *Какое примерно напряжение необходимо оставить на контактах мемристора, чтобы его параметры не изменялись?*

а) 0 В;

б) 2 В;

в) 3 В.

### 5. *В чем заключается принцип действия спинового мемристора?*

а) спины электронов, составляющих ток, ориентируются вдоль магнитных силовых линий;

б) спины электронов, составляющих ток, ориентируются поперек магнитных силовых линий;

в) спины электронов, находящихся в одной фазовой ячейке мемристора, имеют одинаковое направление.



**6. В чем заключается принцип действия мемристора на основе диоксида титана?**

а) кислородные вакансии, содержащиеся в диоксиде титана, будут перемещаться вправо или влево в зависимости от направления тока, при этом изменяется сопротивление резистивного слоя;

б) доменные структуры, содержащиеся в диоксиде титана, будут ориентироваться вдоль электрического поля в зависимости от направления тока, при этом изменяется сопротивление резистивного слоя;

в) при прохождении тока через слой диоксида титана последний нагревается, и в результате этого изменяется сопротивление резистивного слоя.

**7. В чем заключается принцип действия сегнетоэлектрического мемристора?**

а) в изменении поляризации диэлектрика в сегнетоэлектрике и, как результат, изменении сопротивления;

б) в изменении толщины слоя кислородных вакансий и, как результат, изменении сопротивления;

в) в изменении индуктивности диэлектрика в сегнетоэлектрике и, как результат, изменении сопротивления.