

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.8>

УДК: 539.23

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОСТАВНОЙ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ МИШЕНИ С МЕДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МЕМРИСТОРОВ

А.Е. Уразбеков, П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Статья поступила в редакцию 23 октября 2023 г.

**Аннотация.** Представлены результаты получения резистивных элементов памяти и исследование их свойств. Образцы представляли собой структуры металл/диэлектрик/металл, активный слой которого был получен магнетронным распылением составной титаново-медной мишени. Электронно-микроскопический анализ показал, что активный слой после перехода в низкоомное состояние имеет вертикально ориентированную морфологию, указывающий на филаментарный механизм переключения. Изучены вольт-амперные характеристики и эффект резистивного переключения. Обнаружено, что предложенных способ получения диэлектрического слоя является подходящим для изготовления мемристоров. В частности, продемонстрировано, что применение данных пленок в структуре мемристивного элемента памяти позволяет получить отношение состояния с высоким электрическим сопротивлением к состоянию с низким электрическим сопротивлением более чем  $10^2$ .

**Ключевые слова:** резистивное переключение, магнетронная технология, оксид меди, оксид титана, тонкие пленки.

**Финансирование:** Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы “Приоритет 2030”. Работа выполнена в рамках соглашения №075-03-2020-237/1 от 05 марта 2020 г.

**Автор для переписки:** Уразбеков Артур Еркынович, [artur.urazbekov@mail.ru](mailto:artur.urazbekov@mail.ru)

## **Введение**

Объем хранящихся в мире цифровых данных за последние десять лет кратно увеличился. Этим обстоятельством вызван большой интерес к устройствам, демонстрирующим эффекты обратимого резистивного переключения, открывающим путь к созданию сверхъёмких модулей памяти, благодаря наложению нескольких слоев друг на друга, что позволит получить переключающий многомерный и многоканальный механизм, работающий с несколькими слоями одновременно и независимо. Мемристорная память может обладать высокими эксплуатационными характеристиками такими, как быстродействие, энергонезависимость, значительное количество циклов переключения и возможностью сохранять информацию длительное время в широком диапазоне температур [1-3,8,10]. Вместе с тем, поиск материалов диэлектрического слоя мемристора и выбора электродов являются предметом интенсивных исследований

Толкование эффекта резистивного переключения в мемристивных структурах сводится к процессам миграции вакансий кислорода в диэлектрических слоях или ионов металлов, имплантированных в этот слой [4-6]. Внешнее электрическое поле инициирует образование или разрушение токопроводящих каналов, что и влияет на изменение электрического сопротивления мемристора. Большинство мемристивных устройств на сегодняшний день изготавливаются с использованием различных неорганических [1-3,7] и органических материалов [4.9], но одним из первых, и по-прежнему самым популярным, является диоксид титана.

В настоящей работе развивается подход к использованию в мемристорных структурах оксидов Ti и Cu, разработанным технологическим режимом осаждения диэлектрика путем магнетронного распыления составной титаново-медной мишени в кислородосодержащей среде.

### Методика получения и результаты.

Конструкция исследуемых мемристорных структур представляет собой структуры металл-диэлектрик-металл. В качестве нижнего и верхнего электродов применялся слой алюминия толщиной 70 нм, полученный методом термического испарения. В основе методики формирования активного слоя, рассматриваемых в настоящей работе мемристорных структур, заложены процессы, протекающие в плазме тлеющего разряда, создаваемого магнетронным источником распыления, катодом которого являлась составная мишень Ti:Cu (титан-медь). Схема магнетронной установки проиллюстрирована на рис. 1. При этом относительная площадь, занимаемая медными дисками на составной мишени, была около  $\sim 15\%$  от общей площади зоны распыления мишени. Распыление проводилось в атмосфере воздуха при парциальном давлении  $6 \times 10^{-3}$  мм рт. ст. и токе разряда 150 мА.

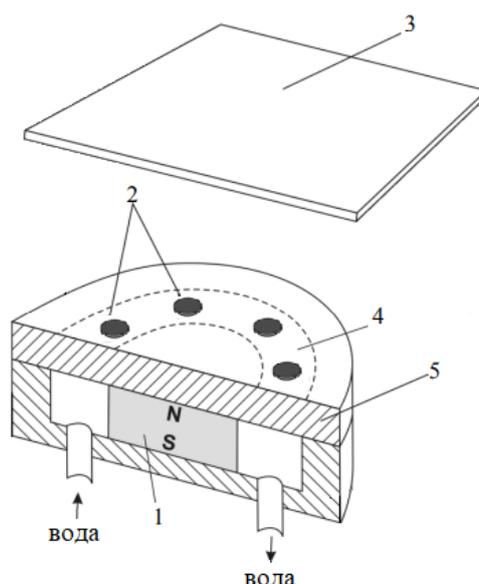


Рис. 1. Схематическое изображение магнетронной распылительной системы: 1 – постоянный магнит; 2 – медные диски; 3 – подложка; 4 – зона распыления; 5 – составная мишень (Ti:Cu).

После осаждения тонкопленочных структур были сняты вольт-амперные характеристики на постоянном напряжении, а также был проведен энергодисперсионный рентгеновский анализ для получения сведений о атомарном составе пленок. Для этого на кремниевой подложке было произведено осаждение диэлектрического слоя при тех же параметрах магнетронного распыления составной титаново-медной мишени (рис. 2.). Количественный анализ дает следующие значения – кислорода 25,25 %, титана 9,62 % и меди 63,33 % (атомная масса меди 63,5 а.е.м., кислорода 16 а.е.м., титана 47,9 а.е.м.). Откуда можно сделать вывод о нестехиометрическом составе пленки и преобладании оксида меди в диэлектрическом слое. Такой состав пленок приводит к образованию дефектов типа кислородных вакансий, миграция которых изменяет проводимость активного слоя.

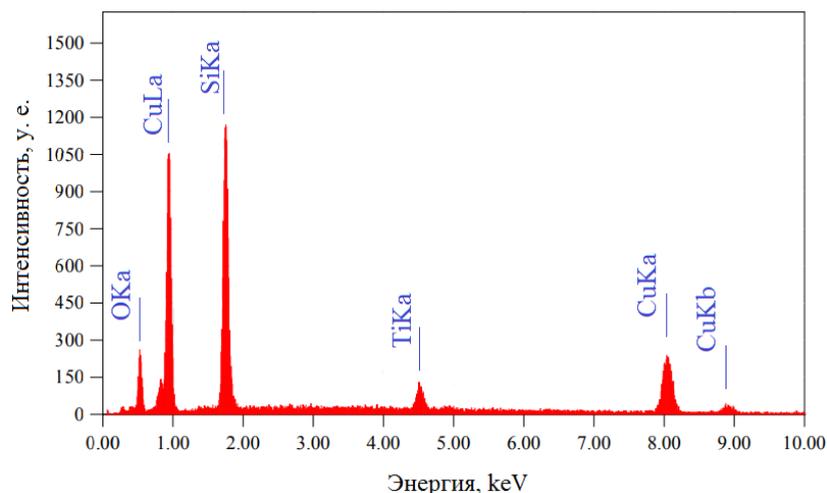


Рис. 2. Энергодисперсионный рентгеновский спектр диэлектрического слоя на кремниевой подложке.

На рис. 3а. показана типичная вольт-амперная характеристика мемристора на основе оксида титана без модификации медью с толщиной диэлектрического слоя ~60 нм. В диапазоне напряжений от -5 до 5 В отношение высокоомного состояния к низкоомному не превышало 3-4. Стоит отметить, что мемристивный эффект данных структур проявляется при толщине диэлектрического слоя в диапазоне от 40 нм вплоть до ~120 нм. Такой диапазон толщины мемристора, при котором имеет место резистивное переключение, объясняется

микрорельефом поверхности алюминиевых электродов. В работе [11] подробно рассмотрены зависимости электрической прочности диэлектрических пленок от микрорельефа электродов. Тонкие пленки алюминия, осажденные на стеклянную подложку, имеют характерные бугорки со средней высотой  $\sim 30$  нм, которые резко снижают электрическую прочность пленок толщиной меньше  $\sim 40$  нм.

Вольт-амперная характеристика мемристора, изготовленного распылением составной мишени, с толщиной активного слоя  $\sim 350$  нм проиллюстрирована на рис. 3б.

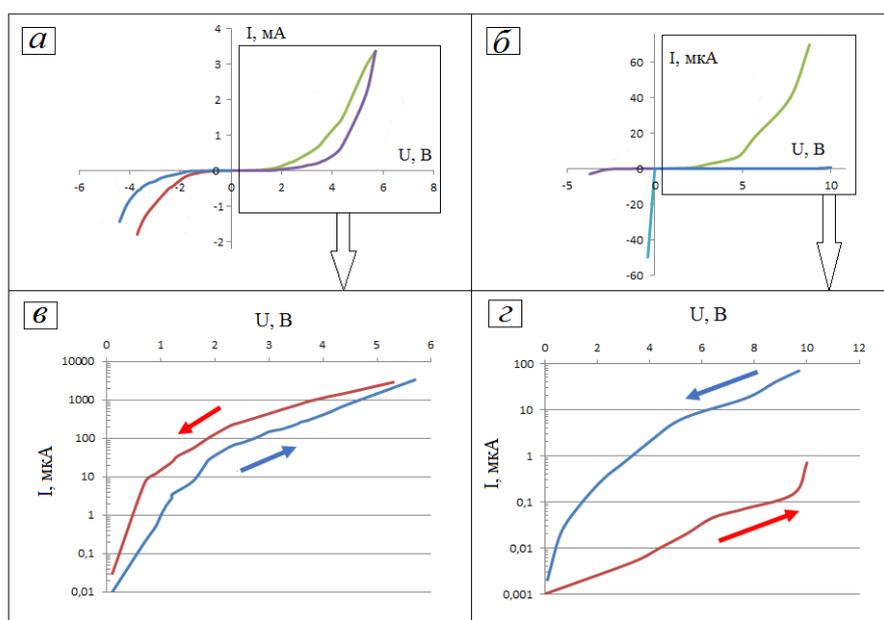


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика структуры на основе оксида титана без модификации медью – *а*. Вольт-амперная характеристика структуры на основе оксида титана, модифицированного медью – *б*. Соответствующие зависимости в логарифмическом масштабе – *в*, *г*.

Видно, что при приложении положительного напряжения около  $9,5$  В мемристор переводится в состояние с низким сопротивлением: изменение электрического сопротивления  $\sim 10^2$ . И аналогичный переход происходит в отрицательном диапазоне напряжений около  $-5$  В, где изменение электрического сопротивления  $\sim 10^3$ . Важным также стоит упомянуть, что напряжение порядка  $12$  В для данных структур приводит к явлению пробоя, которое требует

отдельного внимания и более детального изучения. По этой причине диапазон напряжений не превышал 12 В.

Важным стоит упомянуть, что скорость формирования диэлектрического слоя методом магнетронного распыления составной мишени при токе разряда 150 мА составляла 16 нм/мин, что превышает скорость осаждения пленок диоксида титана без модификации медью при том же режиме напыления примерно в 4-5 раз. Толщина диэлектрического слоя при котором проявляется эффект резистивного переключения таких структур лежит в диапазоне от ~ 100 нм до ~ 400 нм. На рис. 4. показана экспериментальная зависимость напряжения, при котором мемристор переходит в низкоомное состояние, от толщины активного слоя.

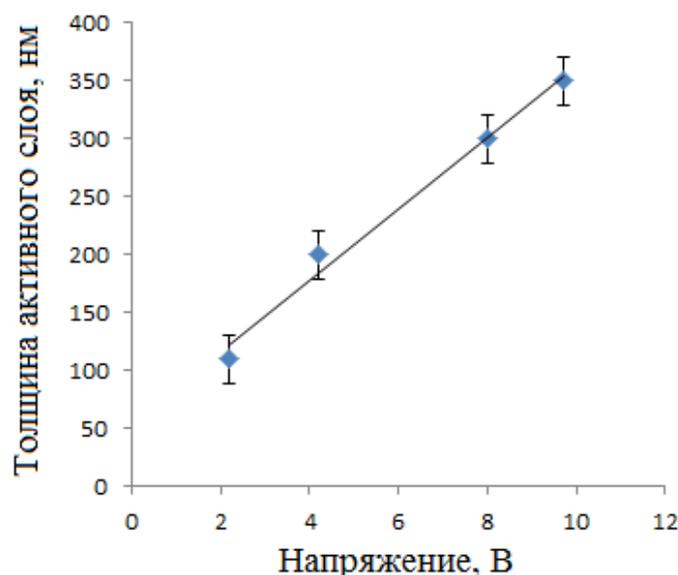


Рис. 4. Зависимость напряжения переключения мемристора от толщины активного слоя.

При исследовании запоминающих свойств данных пленок важно выяснить механизм переключения, реализуемый в представленных структурах. С этой целью было снято растровое изображение торцевого скола структуры после перехода мемристора в низкоомное состояние. Результат представлен на рис. 5. Можно наблюдать, что после воздействия электрического поля структура активного слоя имеет ярко выраженную вертикально-ориентируемую морфологию, которая может подтверждать филаментарный механизм

переключения. Однако, стоит упомянуть, что основной причиной нестабильности характеристик мемристорных устройств является неоднородность распределения электрического поля в активном слое мемристора, в связи с отсутствием строгой геометрии в диэлектрическом слое резистивного элемента памяти. В представленных мемристорных структурах активный слой имеет весьма хаотичное расположение токопроводящих каналов, что указывает на упомянутый выше недостаток.

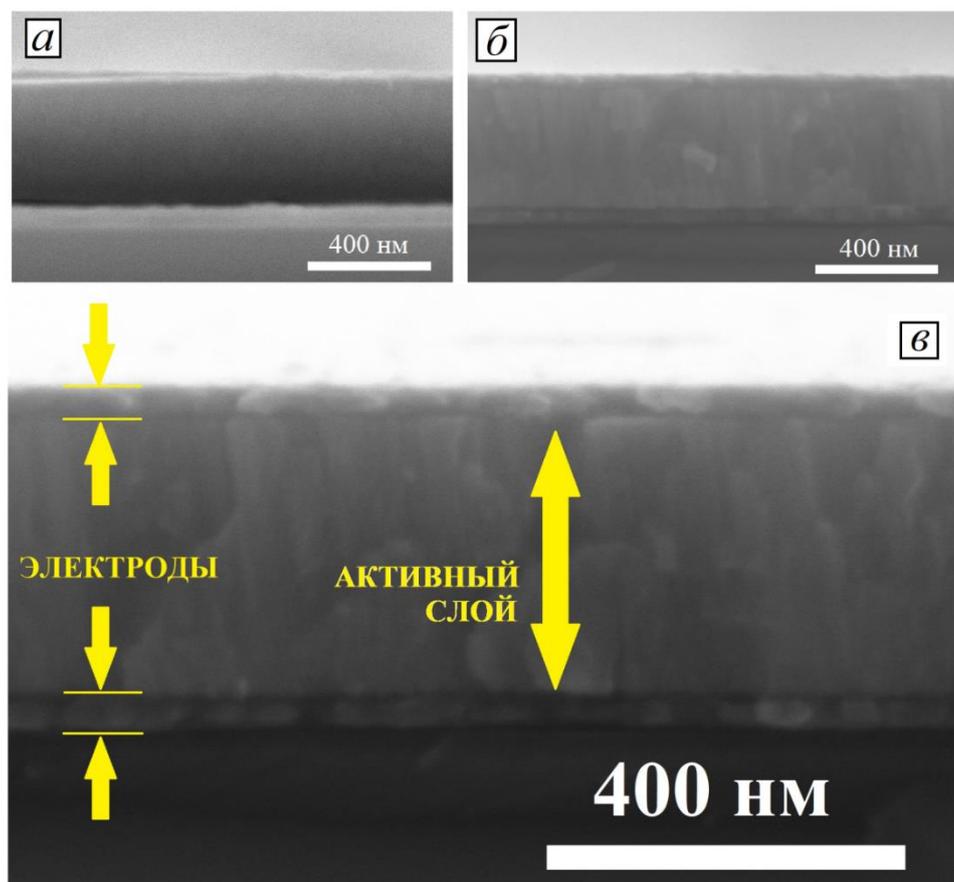


Рис. 5. РЭМ – изображение скола мемристора: *а* – без воздействия электрического поля, *б* – после воздействия электрического поля, *в* – структура мемристора.

## Заключение

Рассмотрена методика получения пленок оксида титана, модифицированных медью, полученных магнетронным распылением составной мишени, для создания на их основе мемристорных структур. С применением растровой электронной микроскопии были получены снимки торцевого скола тонкопленочной структуры. Результатом этого исследования является

подтверждение, доминирующего в настоящий момент филаментарного механизма, реализуемого в представленных в настоящей работе мемристорных структурах. Также продемонстрировано кратное увеличение отношения высокоомного состояния мемристора к низкоомному по сравнению с мемристорами, которые были изготовлены без медных дисков на титановой подложке в процессе магнетронного осаждения.

Полученные результаты показывают целесообразность использования представленной технологии осаждения диэлектрических материалов для изготовления резистивных элементов памяти.

Механизм влияния атомов меди на свойства мемристорных структур требует проведение отдельных исследований.

**Финансирование:** Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы “Приоритет 2030”. Работа выполнена в рамках соглашения №075-03-2020-237/1 от 05 марта 2020 г.

### Литература

1. Strukov D.B. et al. The missing memristor found //nature. – 2008. – Т. 453. – №. 7191. – С. 80-83.
2. Yang J.J., Strukov D. B., Stewart D. R. Memristive devices for computing // Nature nanotech-nology. – 2013. – Т. 8. – №. 1. – С. 13-24.
3. Yang R. Review of resistive switching mechanisms for memristive neuromorphic devices // Chinese Physics B. – 2020. – Т. 29. – №. 9. – С. 097305.
4. Matsukatova A.N. et al. Memristors based on poly (p-xylylene) with embedded silver nanoparticles //Technical Physics Letters. – 2020. – Т. 46. – С. 73-76.
5. Privezentsev V.V. et al. Study of Memristors Based on Silicon-Oxide Films Implanted with Zinc //Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2022. – Т. 16. – №. 3. – С. 402-407.
6. Li W. et al. Design of high-performance memristor cell using W-implanted SiO<sub>2</sub> films //Applied Physics Letters. – 2016. – Т. 108. – №. 15.

7. Ismail M. et al. Enhancement of resistive switching performance by introducing a thin non-stoichiometric CeO<sub>2-x</sub> switching layer in TiO<sub>2</sub>-based resistive random access memory // Applied Physics Letters. – 2019. – Т. 114. – №. 1.
8. Miao F. et al. Anatomy of a nanoscale conduction channel reveals the mechanism of a high-performance memristor // Advanced materials. – 2011. – Т. 23. – №. 47. – С. 5633-5640.
9. Stewart D.R. et al. Molecule-independent electrical switching in Pt/organic monolayer/Ti devices // Nano Letters. – 2004. – Т. 4. – №. 1. – С. 133-136.
10. Chua L. Memristor-the missing circuit element // IEEE Transactions on circuit theory. – 1971. – Т. 18. – №. 5. – С. 507-519.
11. Троян П.Е., Свириденко М.А. Влияние соотношения микрорельефа электрода и толщины диэлектрического слоя на электрическую прочность и напряженность формовки тонкопленочных структур металл-диэлектрик-металл // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. – 2023. – Т. 15. – №. 2. – С. 22-28.

**Для цитирования:**

Уразбеков А.Е., Троян П.Е., Сахаров Ю.В. Особенности применения составной двухкомпонентной мишени с медными включениями при магнетронном распылении для создания мемристоров. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.8>