

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.10>

УДК: 539.23

РАЗРАБОТКА МОДИФИКАЦИЙ МЕМРИСТОРА СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

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 1 июля 2026 г.

Аннотация. В настоящей статье представлена разработка модификаций мемристора со вспомогательным электродом и верификация предлагаемого технического решения, отличающегося принципиально новой конструкцией. Образцы представляли собой многослойные мемристивные структуры с алюминиевыми электродами и активным слоем, полученным магнетронным распылением гафниевых и танталовых мишеней. Вспомогательный электрод формировался с применением комплекса на базе автоэмиссионного растрового электронного микроскопа серии Zeiss Supra 55 с блоком для электронно-лучевого экспонирования Raith 150. Показано, что предложенное конструктивное решение позволяет повысить отношение резистивных состояний более чем в два раза при одних и тех же условиях формирования активного слоя мемристора, а также уменьшить разброс его рабочих напряжений.

Ключевые слова: мемристор, оксид гафния, оксид тантала, резистивный эффект.

Финансирование: Работа была выполнена командой научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Автор для переписки: Уразбеков Артур Еркынович, artur.urazbekov@tusur.ru

Введение

Толкование мемристивного эффекта для большинства известных на сегодняшний день элементов резистивной памяти можно дифференцировать на два механизма синтеза и разрушения токопроводящих каналов в среде активного слоя: механизм электрохимической металлизации, механизм изменения валентности [1]. Первый заключается в электрохимическом разложении электрода (чаще всего выполненного из благородных металлов) и дальнейшему дрейфу катионов металла внутрь активного слоя, которые нейтрализуются и формируют металлический канал. Второй механизм состоит в том, что вакансии кислорода (дефекты активного слоя) под действием электрического поля дрейфуют к отрицательному электроду, восстанавливая материал активного слоя, приводящего к снижению электрического сопротивления той области, где аккумулируются вакансии кислорода [2-9].

Обратимое формирование и разрушение токопроводящих нитей характеризуется выраженной стохастичностью, что обуславливает нестабильность эксплуатационных характеристик устройства и ограничивает его практическое применение. Снижение влияния стохастических факторов в функционировании мемристора достигается посредством реализации предложенной концепции компоновки внутренней структуры устройства, предусматривающей введение дополнительного электрода.

Настоящая работа развивает идею, описанную в работе [10], и расширяет рамки базовой концепции, предлагая ее ключевые усовершенствования.

Методика получения и результаты

Конструктивно образцы представляли собой последовательно нанесенные на кремниевые подложки слои – слой диэлектрика с мемристивными свойствами и трех электродов, два из которых соединены между собой.

Первый вариант конструкции с расположенным вспомогательным электродом между верхним и нижним, соединенный с нижним электродом, изображен посредством моделирования в программной среде TCAD на рис. 1. Во вспомогательном электроде сформированы отверстия для создания неслучайного массива токопроводящих нитей. Такое конструктивное решение позволяет группировать дефекты активного слоя мемристора (вакансии кислорода) возле отверстия, создавая регулярно расположенные зародыши токопроводящих нитей. Недостатком является удвоенная толщина, так как диэлектрический слой между нижним и вспомогательным электродом, служащий своего рода дополнительным источником кислородных вакансий, имеет соизмеримую толщину с диэлектрическим слоем между вспомогательным и верхним электродом.

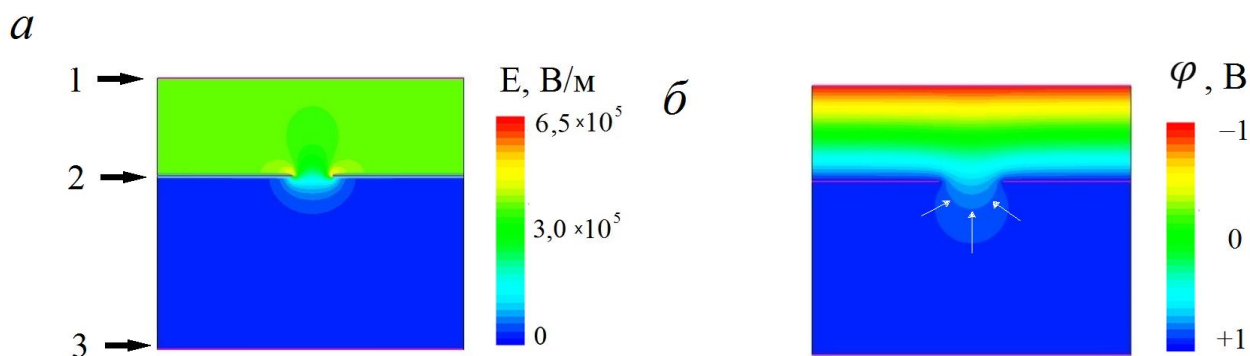


Рис. 1. Иллюстрация первой модификации мемристора:
 а – распределение напряженности электрического поля (1 – верхний электрод, 2 – вспомогательный электрод, 3 – нижний электрод);
 б – распределение электрического потенциала.

Второй вариант модификации мемристора изображен на рис. 2., где вспомогательный электрод (нижний справа) соединен с верхним и поэтому имеет тот же потенциал. Такое расположение вспомогательного электрода поверх активного слоя группирует вакансии кислорода в определенном участке,

а именно у края нижнего (левого) электрода, но при этом толщина мемристора не увеличивается как в варианте, представленном выше.

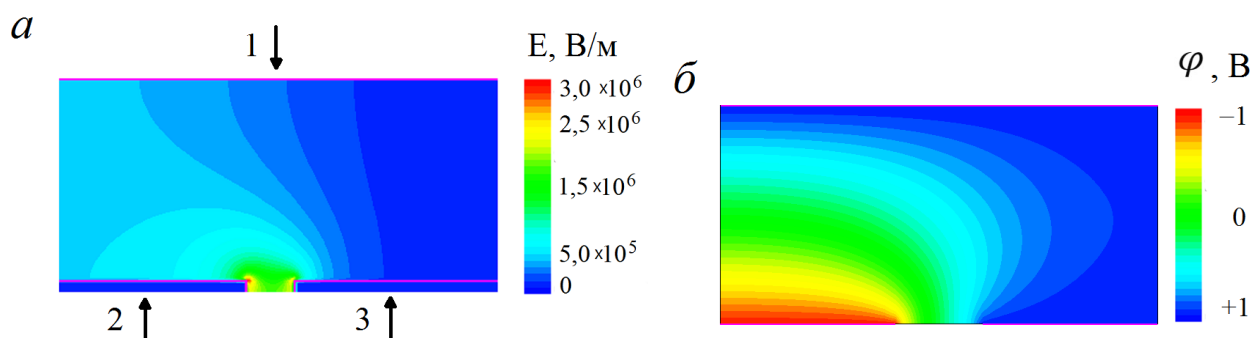


Рис. 2. Иллюстрация второй модификации мемристора:
а – распределение напряженности электрического поля (1 – верхний электрод, 2 – нижний электрод, 3 – вспомогательный электрод);
б – распределение электрического потенциала.

Вспомогательный электрод формировался с применением комплекса на базе автоэмиссионного растрового электронного микроскопа серии Zeiss Supra 55 с блоком для электронно-лучевого экспонирования Raith 150 (Рис. 3.).

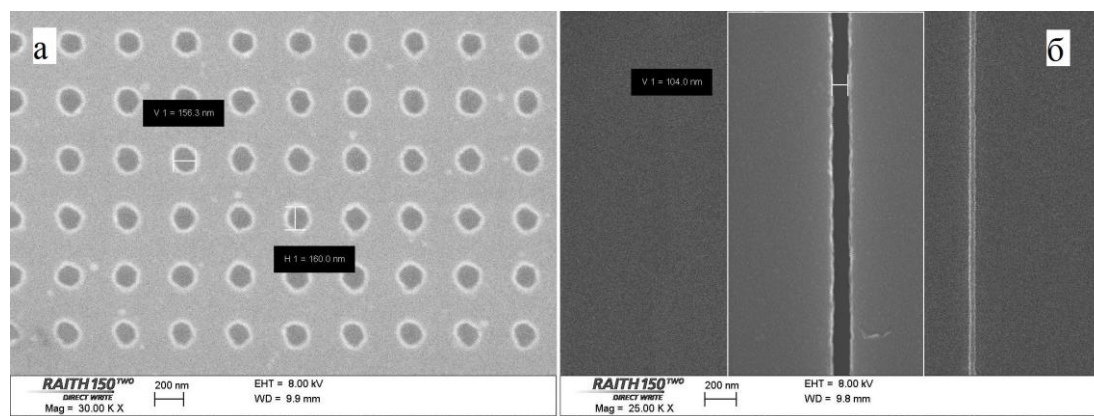


Рис. 3. РЭМ-изображение вспомогательного электрода:
а – с массивом отверстий; б – с промежутком между нижним и вспомогательным электродом.

Напряженность электрического поля в обоих случаях, у краев электродов и отверстий, будет в 2-3 раза больше, чем в объеме диэлектрического слоя, из-за увеличения поверхностной плотности зарядов в местах малого радиуса кривизны проводника. В силу этого обстоятельства расстояние между вспомогательным и нижним электродами следует увеличить для предотвращения пробоя. С другой стороны, локальное повышение

напряженности электрического поля инициирует зарождение филамента – это связано с нагревом и ростом подвижности кислородных вакансий либо катионов металла. В результате создаются условия для формирования гибридного или многофиламентного режима переключения.

Работоспособность технического решения верифицировалась на опытных мемристорах для разных материалов диэлектрического слоя, сформированных магнетронным распылением металлических подложек в кислородосодержащей среде – Ta_2O_5 , HfO_2 . Распыление проводилось в атмосфере воздуха при парциальном давлении 6×10^{-3} мм рт. ст. и токе разряда 150 мА.

Для второй модификации мемристора с активным слоем Ta_2O_5 толщиной 80 нм и алюминиевыми электродами, где между нижним и вспомогательным электродом зазор порядка 100 нм (рис. 3б), отношение резистивных состояний при напряжении чтения 2 В (напряжение переключения $\sim 4,5$ В) составило ~ 10 . В сравнении с мемристором без вспомогательного электрода, значения напряжения переключения $\sim 5,2$ В, а отношение резистивных состояний ~ 5 . Для мемристоров на основе HfO_2 отношение резистивных состояний увеличилось примерно в 2,5 раза (рис. 4.).

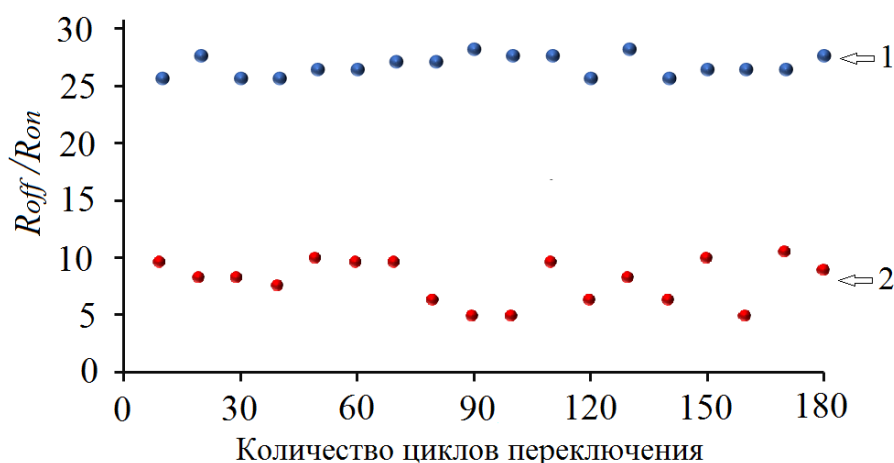


Рис. 4. Зависимость отношения резистивных состояний мемристора от циклов переключения: 1 – модифицированный мемристор; 2 – исходный мемристор.

Для первой модификации показатели эксперимента незначительно превышали первый в отношении увеличения отношения резистивных состояний. Однако устойчивость к многократному переключению была выше: относительное

среднеквадратичное отклонение $\sigma/\mu(R_{\text{off}}/R_{\text{on}}) = 10 \%$. Для рабочих напряжений разброс около 5 %.

Заключение

Следует обозначить, что методологический фокус настоящего исследования концентрируется на верификации концепции, отражающей характер влияния вспомогательного электрода на ключевые параметры функционирования мемристора. При этом конкретный материал, использованный в экспериментальной части работы, выступает в качестве демонстрации, позволяющей эмпирически подтвердить работоспособность заявленной концепции и проиллюстрировать ее практическую реализуемость.

Финансирование: Работа была выполнена командой научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FEWM 2024-0004

Литература

1. Исаев А. Г., Пермякова О. О., Рогожин А. Е. Оксидные мемристоры для ReRAM: подходы, характеристики, структуры //Микроэлектроника. – 2023. – Т. 52. – №. 2. – С. 127-151.
2. Laurenti M. et al. Zinc oxide thin films for memristive devices: a review //Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2017. – Т. 42. – №. 2. – С. 153-172.
3. Zhuo V. Y., Chen Z., Chui K. J. Resistive Random Access Memory Device Physics and Array Architectures //Emerging Non-volatile Memory Technologies: Physics, Engineering, and Applications. – Singapore : Springer Singapore, 2021. – С. 319-343.
4. Feng P. A. N. et al. Nonvolatile resistive switching memories-characteristics, mechanisms and challenges //Progress in Natural Science: Materials International. – 2010. – Т. 20. – С. 1-15.

5. Lee J. et al. Improved resistive switching characteristics of Au/TiO₂/Au memristors on PDMS substrates with pyramid arrays //Materials Science and Engineering: B. – 2025. – Т. 314. – С. 117986.
6. Ghenzi N., Acha C. Exploring the synaptic response of reactive Mn electrodes based TiO₂ resistive switches //Solid-State Electronics. – 2025. – Т. 223. – С. 109033.
7. Hernández-Rodríguez E. et al. Effect of electrode type in the resistive switching behaviour of TiO₂ thin films //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – Т. 46. – №. 4. – С. 045103.
8. Hasina D. et al. Surfing the Growth Parameters in the Quest for Low-Power, Forming-Free, and Highly Stable TiO_x Memristors for Nanoscale Electronics //Small. – 2025. – Т. 21. – №. 7. – С. 2408369
9. Yeon H. et al. Alloying conducting channels for reliable neuromorphic computing //Nature Nanotechnology. – 2020. – Т. 15. – №. 7. – С. 574-579.
10. Уразбеков А. Е. и др. Новый способ увеличения параметра мемристора R_{off}/R_{on} на примере тонкопленочной структуры на основе оксида титана //Письма в ЖТФ. – 2025. – Т. 51. – №. 12.

Для цитирования:

Уразбеков А.Е., Троян П.Е., Сахаров Ю.В. Разработка модификаций мемристора со вспомогательным электродом. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.10>