

07 Новый способ увеличения параметра мемристора R_{off}/R_{on} на примере тонкопленочной структуры на основе оксида титана

© А.Е. Уразбеков, П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, М.А. Свириденко

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия
E-mail: artur.urazbekov@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 января 2025 г.

В окончательной редакции 25 марта 2025 г.

Принято к публикации 25 марта 2025 г.

Предложен способ увеличения параметра мемристора R_{off}/R_{on} методом введения в его конструкцию дополнительного электрода меньшей площади, соединенного с нижним электродом. На примере мемристора на основе TiO_x с алюминиевыми электродами показано, что данный способ позволяет увеличить R_{off}/R_{on} не менее чем в 3 раза.

Ключевые слова: мемристор, резистивное переключение, кислородные вакансии, оксид титана, тонкопленочные структуры.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.12.60613.20267

Создание вычислительных устройств является приоритетным направлением работ в информационных технологиях. В качестве наилучшего претендента для формирования компьютерной памяти будущего поколения специалистами называется резистивная память с произвольным доступом (Resistive Random-Access Memory, RRAM). В настоящее время исследование эффекта резистивного переключения мемристорных элементов памяти остается актуальным благодаря большим перспективам их применения при обработке цифровых данных в мире. В самом простом случае мемристор может быть представлен МДМ-структурой (МДМ — металл–диэлектрик–металл), где сопротивление диэлектрического слоя меняется от протекшего через него электрического заряда (интеграла тока по времени). Первые надежные результаты исследования эффекта резистивного переключения были получены на пленках оксида титана [1], в которых данный эффект проявляется благодаря электромиграции кислородных вакансий, восстанавливая TiO_2 до TiO_{2-x} , уменьшая сопротивление активного слоя мемристора. С тех пор было исследовано влияние материала электродов мемристора, а также его формы и способа осаждения активного слоя на резистивный эффект [2–6]. Наряду с этим также имеет место механизм, основанный на формировании токопроводящих нитей из атомов металла электродов мемристорной структуры [7]. Одним из основных параметров мемристора является отношение сопротивления в высокоомном состоянии к сопротивлению в низкоомном R_{off}/R_{on} в сочетании с количеством циклов переключения и временем хранения информации.

В настоящей работе мы предприняли попытку улучшения параметра R_{off}/R_{on} на примере мемристорной структуры на основе TiO_x простым техническим решением, не затрагивающим метод формирования активного слоя, путем модификации конструкции мемристора до-

полнительным электродом, находящимся в его активной области, соединенным одним концом с нижним.

Реализация предложенного метода осуществлялась путем последовательного осаждения слоев на подложку. Нижний алюминиевый электрод формировался путем термического испарения в вакууме при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ мм Hg. Следующий слой осаждался магнетронным распылением титановой мишени в атмосфере

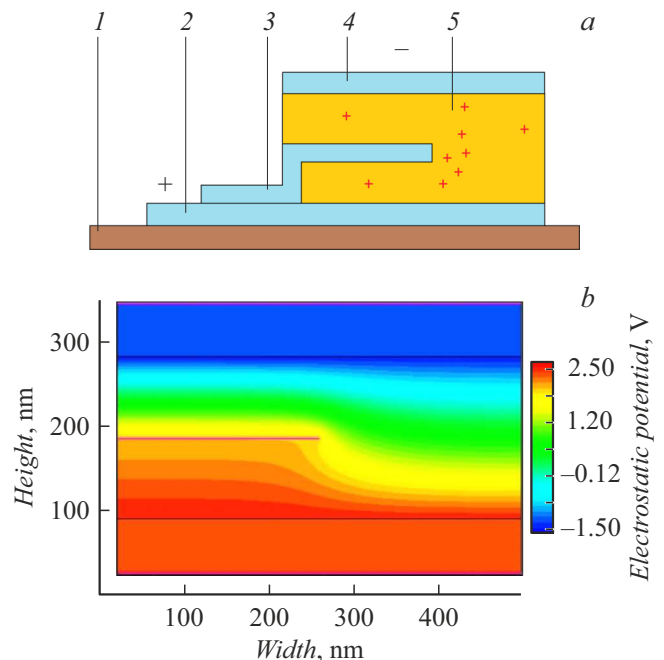


Рис. 1. *a* — структура мемристора с дополнительным электродом. 1 — подложка; 2 — нижний электрод; 3 — дополнительный электрод, не полностью покрывающий площадь мемристора, соединенный с нижним; 4 — верхний электрод; 5 — кислородные вакансии. *b* — распределение электрического потенциала при приложении к нижнему электроду +2 V.

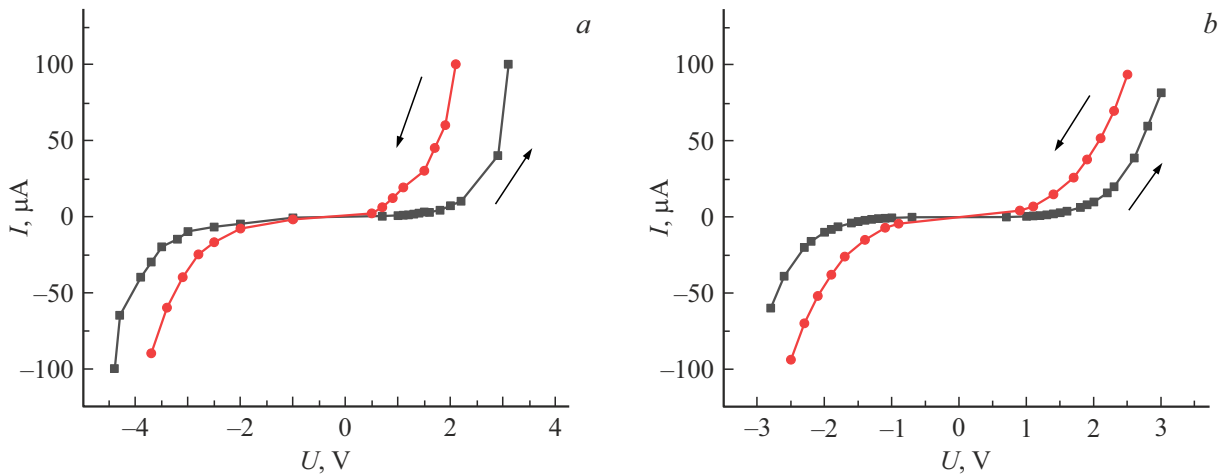


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики мемристора с дополнительным электродом (а) и его прототипа, изготовленного при тех же условиях, но без дополнительного электрода (b).

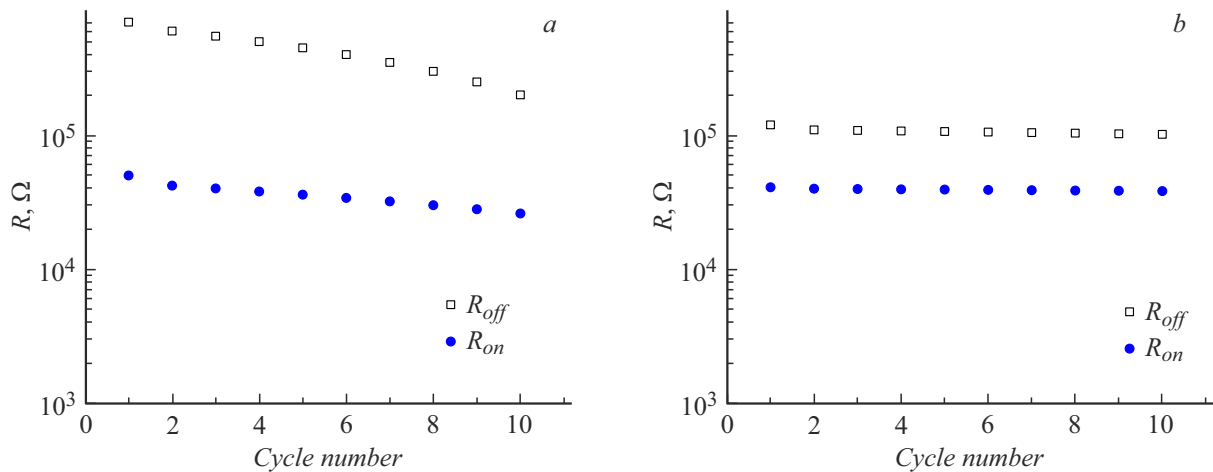


Рис. 3. Сопротивления в высокоомном (R_{off}) и низкоомном (R_{on}) состояниях для положительной (а) и отрицательной (b) ветвей вольт-амперной характеристики для нескольких циклов переключения.

воздуха при давлении $6 \cdot 10^{-3}$ mm Hg и имел толщину от 40 до 100 nm. Затем осаждался алюминиевый слой (дополнительный электрод меньшей площади, частично покрывающий нижний электрод), толщина которого не превышала 30 nm. Далее при тех же условиях формировался слой оксида титана толщиной от 40 до 100 nm. На финальной стадии производилось напыление верхнего алюминиевого электрода. На рис. 1, а схематично показана структура мемристора с дополнительным электродом.

Определенную ясность в понимании идеи, изложенной в настоящей работе, может дать моделирование распределения электрического потенциала с учетом особенностей конструкции в системе TCAD (технология автоматизированного проектирования). В том случае, когда на нижний электрод подается положительный потенциал (в примере 2 V), происходит деформация электрического поля таким образом, что у края дополнительного элект-

рода формируется область с градиентом потенциала, за счет чего происходит дрейф кислородных вакансий из диэлектрического слоя, расположенного между дополнительным электродом и нижним (рис. 1, b). В результате у края дополнительного электрода образуется место скопления кислородных вакансий, что приводит к восстановлению TiO_2 до TiO_{2-x} . Эта область будет характеризоваться пониженным электрическим сопротивлением, а слой между одноименно заряженными нижним и дополнительным электродами (поскольку они соединены друг с другом) будет выполнять функцию источника кислородных вакансий.

Проверка эксплуатационных характеристик мемристора включала в себя измерение на постоянном напряжении вольт-амперной зависимости (рис. 2) и определение стабильности переключения для десяти циклов (рис. 3).

Для исследуемых структур, когда к нижнему электроду приложен положительный потенциал, а к верх-

нему — отрицательный, мемристор находится в высокоомном состоянии до достижения напряжения примерно 3 V, когда ток начинает резко возрастать (мемристор переключается в состояние с низким сопротивлением). Затем при уменьшении напряжения (ветвь вольт-амперной характеристики, обозначенная кружками на рис. 2) вплоть до напряжения переключения в отрицательной ветви структура будет иметь низкое электрическое сопротивление. Другими словами, при напряжении до ~ 2 V, когда величина напряженности электрического поля не вносит больших изменений в структуру, параметр $R_{off}/R_{on} \sim 15$ для положительной ветви вольт-амперной характеристики, а в отрицательной области $R_{off}/R_{on} \sim 3$ при напряжении чтения ~ 3 V. В обоих случаях структуры демонстрируют приемлемую стабильность. Объяснение того обстоятельства, что для отрицательной ветви вольт-амперной характеристики мемристивный эффект проявляется слабее, следует искать в том, что, когда на дополнительный и нижний электроды подается отрицательный потенциал, не будет условия скопления положительно заряженных кислородных вакансий, так как их дрейф будет разделен на два потока: к нижнему электроду и в область между нижним и дополнительным электродом. Сравнительный анализ с мемристорами на основе оксида титана, полученными тем же способом, но без дополнительного электрода (рис. 2, b), указывает на увеличение резистивного окна памяти устройства в положительной ветви вольт-амперной характеристики при применении предложенного технического решения не менее чем в 3 раза, поскольку при напряжении чтения 2 V параметр $R_{off}/R_{on} \sim 5$ с менее резким переключением.

Таким образом, представленное конструктивное решение позволяет увеличить отношение резистивных состояний мемристора, не изменяя способ получения его активного слоя. Однако заметим, что данное решение применимо только для мемристивных структур, где природа резистивного переключения связана с электромиграцией кислородных вакансий.

Финансирование работы

Работа выполнена в научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams, *Nature*, **453** (7191), 80 (2008). DOI: 10.1038/nature06932
- [2] J. Lee, K. Song, K.Y. Shin, W. Lee, *Mater. Sci. Eng. B*, **314**, 117986 (2025). DOI: 10.1016/j.mseb.2025
- [3] N. Ghenzi, C. Acha, *Solid-State Electron.*, **223**, 109033 (2025). DOI: 10.1016/j.sse.2024.109033
- [4] E. Hernández-Rodríguez, A. Márquez-Herrera, E. Zaleta-Alejandre, M. Meléndez-Lira, W. De La Cruz, M. Zapata-Torres, *J. Phys. D*, **46** (4), 045103 (2012). DOI: 10.1088/0022-3727/46/4/045103
- [5] D. Hasina, A. Mandal, S.K. Srivastava, A. Mitra, T. Som, *Small*, **21** (7), 2408369 (2025). DOI: 10.1002/sml.202408369
- [6] A.E. Urazbekov, P.E. Troyan, Y.V. Sakharov, *J. Radio Electron.*, № 12 (2023). DOI: 10.30898/1684-1719.2023.12.8
- [7] H. Yeon, P. Lin, Ch. Choi, S.H. Tan, Y. Park, D. Lee, J. Lee, F. Xu, B. Gao, H. Wu, H. Qian, Y. Nie, S. Kim, J. Kim, *Nat. Nanotechnol.*, **15** (7), 574 (2020). DOI: 10.1038/s41565-020-0694-5