

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.165>

ОДНОСТОРОННЯЯ ПРОВОДИМОСТЬ МЕМРИСТИВНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НАНОТРУБОК ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

Научная статья

Вохминцев А.С.¹, Петренёв И.А.^{2,*}, Камалов Р.В.³, Вайнштейн И.А.⁴

¹ORCID : 0000-0003-2529-3770;

²ORCID : 0000-0002-2634-3445;

³ORCID : 0000-0001-6034-2844;

⁴ORCID : 0000-0002-5573-7128;

^{1, 2, 3, 4} Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (i.a.petrenev[at]urfu.ru)

Аннотация

Методом анодирования синтезированы нанотрубки ZrO_2 с внешним диаметром 25 нм. Методом магнетронного напыления изготовлены образцы мемристоров со слоистой структурой $Zr/ZrO_2/Au$. Измерены вольт-амперные характеристики в полных циклах резистивного переключения. Продемонстрирована односторонняя проводимость исследуемой структуры. На основании изменения электрического сопротивления мемристоров при воздействии приложенного напряжения сделан вывод о высокой синаптической пластичности $Zr/ZrO_2/Au$ мемристоров.

Ключевые слова: мемристор, резистивное переключение, проводимость, диоксид циркония, нанотрубки.

ONE-WAY CONDUCTIVITY OF THE MEMRISTIVE STRUCTURE BASED ON ZIRCONIUM DIOXIDE NANOTUBES

Research article

Vokhmintsev A.S.¹, Petrenyov I.A.^{2,*}, Kamalov R.V.³, Vainshtein I.A.⁴

¹ORCID : 0000-0003-2529-3770;

²ORCID : 0000-0002-2634-3445;

³ORCID : 0000-0001-6034-2844;

⁴ORCID : 0000-0002-5573-7128;

^{1, 2, 3, 4} Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (i.a.petrenev[at]urfu.ru)

Abstract

The anodizing technique was used to synthesize ZrO_2 nanotubes with an outer diameter of 25 nm. Memristors with a $Zr/ZrO_2/Au$ layered structure were fabricated with magnetron sputtering. Current-voltage characteristics were measured in complete cycles of resistive switching. It has been demonstrated that the structure under study has unidirectional conductance. Considering the change in the electrical resistance of fabricated memristors under an applied voltage, it was concluded that $Zr/ZrO_2/Au$ memristors show high synaptic plasticity.

Keywords: memristor, resistive switching, conductivity, zirconium dioxide, nanotubes.

Введение

В настоящее время одним из перспективных направлений в создании нейрочипов, элементов нейровычислительных систем и искусственных нейронных сетей (ИНС) является разработка гибридных схем с аналого-цифровой архитектурой, совмещенной с кроссбар-структурой [1], [2], [3]. В таких схемах нейроны изготавливают на основе обычных интегральных КМОП-транзисторов, аксонами и дендритами служат металлические проводники кроссбар-структуры. При этом роль синапсов выполняют двухполюсные мемристоры коммутационной матрицы в точках схождения проводников, которые соединяют пресинаптические и постсинаптические нейроны.

Как правило, связи между нейронами в существующем многообразии архитектур ИНС являются однонаправленными с точки зрения распространения возбуждения [4]. В связи с этим перспективным представляется создание и исследование мемристивных структур металл/диэлектрик (полупроводник)/металл (МДМ-структур) с односторонней электрической проводимостью и возможностью ее варьирования при изменении прошедшего электрического заряда.

Ранее [2], [5], [6], [7] эффект обратимого резистивного переключения наблюдался в МДМ-структурах на основе оксидов переходных металлов (TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 и др.) различной морфологии, полученных методом электрохимического окисления. В таких твердотельных средах мемристивное поведение обеспечивается, как правило, подвижностью катионных или анионных вакансий в слое диэлектрика, а его толщина и дефектность определяют состояния с низким (LRS), промежуточным (IRS) и высоким (HRS) электрическими сопротивлениями [1], [2], [3]. Известно, что анодные оксидные слои обладают сильной нестехиометрией по кислороду [9], [10], что и обеспечивает для них широкий диапазон изменения электрического сопротивления. Кроме того, подбор материала верхнего электрода позволяет получить МДМ-структуру с односторонней проводимостью за счёт образования диода Шоттки на границе металл/оксид [11].

Цель настоящей работы заключалась в изготовлении, аттестации сэндвич-структур с односторонней электрической проводимостью на основе массивов нанотубулярного диоксида циркония и исследовании их статических вольт-амперных характеристик.

Основные результаты

2.1. Изготовление МДМ-структуры

Мемристивная структура $Zr/ZrO_2/Au$ изготовлена с помощью методов анодирования металлического Zr [12] и магнетронного напыления Au на поверхность оксидного слоя.

Металлическая фольга Zr толщиной 120 мкм, которая использовалась для синтеза поверхностного слоя ZrO_2 , предварительно промывалась ацетоном, обрабатывалась раствором кислот $HF:HNO_3:H_2O = 1:6:20$, промывалась дистиллированной водой и сушилась на воздухе. Процесс анодирования проводился в двухэлектродной ячейке при постоянном напряжении 20 В в течение 15 мин. Электролитом являлся раствор этиленгликоля, содержащий 5 мас. % H_2O и 1 мас. % NH_4F . Все химические реактивы были аналитической чистоты.

На поверхность полученного образца структуры Zr/ZrO_2 наносились золотые контакты с помощью шаблона с отверстиями диаметром 1 мм на установке магнетронного напыления Q150T ES Quorum Technologies. Осаждение производилось в течение 500 с, в результате толщина напыленного слоя Au составила 50 нм. Таким образом, в рамках единого процесса были сформированы 100 мемристоров $Zr/ZrO_2/Au$.

2.2. Аттестация ZrO_2 и измерение ВАХ

Морфология синтезированных структур исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) SIGMA VP Carl Zeiss, оборудованного *in-lens* детектором в режиме высокого вакуума.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) в статическом режиме проводились на оригинальной экспериментальной установке [13] на основе микрозондовой станции Cascade Microtech MPS150 и управляемого модульного источника-измерителя NI PXIe-4143. Циркониевая фольга заземлялась, а на Au -контакты подавался гармонический сигнал $U(t) = U_0 + U_m \sin(2\pi ft)$ с частотой $f = 0.01$ Гц [14]. Амплитуда приложенного напряжения U_m и напряжение смещения U_0 варьировались для изменения $U(t)$ в диапазоне от -8 В до 8 В. Автоматизация процедуры измерения и сохранения экспериментальных данных осуществлялось с использованием виртуального прибора VI «CVC» в графической среде программирования LabVIEW [13].

2.3. Аттестация нанотубулярного массива ZrO_2

На рис. 1 представлено СЭМ-изображение поверхности синтезированного образца ZrO_2 (А) и боковой срез оксидного слоя (Б). Видно, что в результате электрохимического окисления на Zr -фольге образовался массив упорядоченных нанотрубок с внешним диаметром ≈ 25 нм и длиной ≈ 3 мкм. Нами ранее в [15] методом рентгенофазового анализа было показано, что массив ZrO_2 содержит 90% тетрагональной и 10% моноклинной фаз.

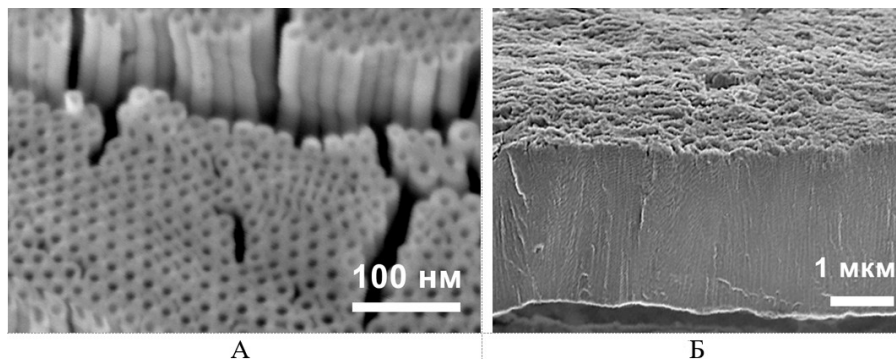


Рисунок 1 - Нанотубулярный массив диоксида циркония

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.165.1>

Примечание: А – вид сверху; Б – вид сбоку

2.4. Вольт-амперные характеристики мемристоров $Zr/ZrO_2/Au$

На рис. 2 представлены временные зависимости для электрического тока, протекающего через исследуемый мемристор при изменении приложенного гармонического напряжения $U(t)$ при $U_0 = 2$ В, $U_m = 6$ В (А) и $U_0 = 0$ В, $U_m = 8$ В (Б) для 11 периодов измерения. Видно, что при $U(t) > 0$ В регистрируются максимальные значения токов в диапазоне $I = 17\text{--}150$ мА, а при $U(t) < 0$ наблюдается небольшой обратный ток $I_S < 0.4$ мА. Указанные временные зависимости являются типичными для электронных устройств с односторонней проводимостью. Из рис. 2А видно, что максимальное значение монотонно увеличивается от 73 до 150 мА для первых 4 циклов измерений, а в последующих циклах изменения U стабилизируется в диапазоне $I_{max} = 110\text{--}150$ мА. На рис. 2Б показано монотонное падение максимального тока в диапазоне 30–17 мА, что свидетельствует об изменении электрического сопротивления исследуемых $Zr/ZrO_2/Au$ мемристоров почти в 2 раза при описанных условиях измерений.

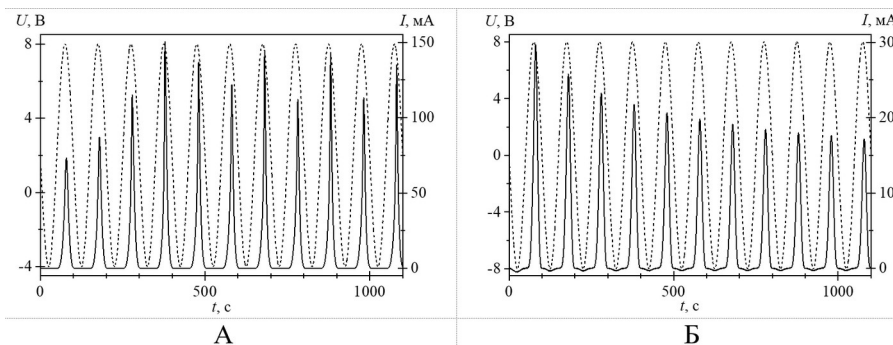


Рисунок 2 - Зависимости приложенного напряжения U (пунктирная линия) и протекающего тока I (сплошная линия) от времени t для мемристора $Zr/ZrO_2/Au$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.165.2>

На рис. 3 построены ВАХ по экспериментальным данным рис. 2. Видно, что при $U > 0$ В регистрируются петли ВАХ, характерные для МДМ-структур с резистивным переключением по биполярному механизму [1], [2], а при $U < 0$ В наблюдается типичная ветвь ВАХ для диода при обратном смещении. Согласно сказанному на вставке рис. 3А приведена эквивалентная электрическая схема замещения исследуемой $Zr/ZrO_2/Au$ сэндвич-структуры. Электрическая цепь состоит из последовательно соединения диода Шоттки VD и мемристора M .

Известно, что работа выхода электрона для металлических контактов составляет $W_{Au} = 5.1$ эВ и $W_{Zr} = 4.05$ эВ [16]. Согласно [17], для диоксида циркония – стехиометричного и насыщенного по кислороду – соответствующие величины составляют $W_{ZrO_2} = 4.6$ эВ и 5.1 эВ. Тогда для кислород-дефицитных структур ZrO_{2-x} с проводимостью n -типа или нанотрубок анодного ZrO_2 можно предположить, что $W_{ZrO_{2-x}} < 4.6$ эВ. Сопоставляя значения работы выхода для слоёв исследуемой МДМ-структуры, можно сказать, что на интерфейсе Au/ZrO_2 образуется барьер Шоттки, а контакт Zr/ZrO_2 является омическим. Приведенные рассуждения согласуются с выводами исследований механизмов проводимости в мемристивных структурах на основе оксидов переходных металлов (ZrO_2 , TiO_2 и др.) [18], [19], [20], [21]. Ранее нами [23] было показано, что до электроформирования в исследуемой мемристивной структуре реализуется проводимость в рамках модели эмиссии Шоттки. Отметим, что при $|U| > 8$ В в оксидном слое происходит формирование проводящих каналов, которые шунтируют барьер Шоттки на интерфейсе Au/ZrO_2 , и мемристоры переходят в LRS [23].

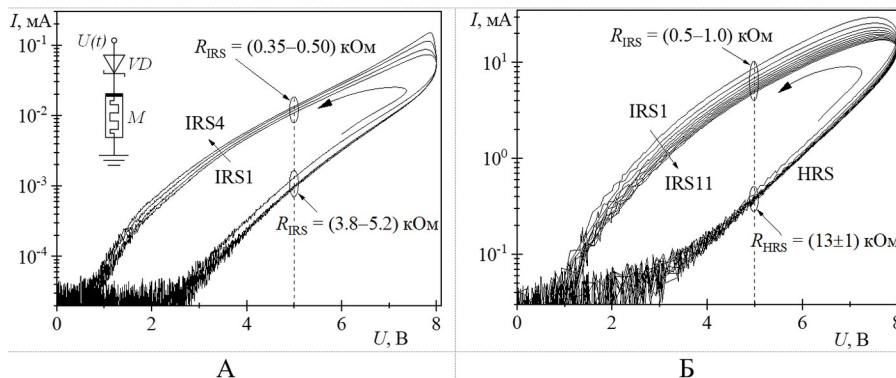


Рисунок 3 - Вольт-амперные характеристики резистивного переключения мемристора $Zr/ZrO_2/Au$ при $U \geq 0$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.165.3>

Примечание: А) $U_0 = 2$ В, $U_m = 6$ В; Б) $U_0 = 0$ В, $U_m = 8$ В;

стрелками показано направление записи ВАХ; на вставке приведена эквивалентная схема исследуемой МДМ-структуры

При $U > 0$ В нижние ветви ВАХ воспроизводят друг друга, а верхние ветви монотонно смещаются вверх (рис. 3А) или вниз (рис. 3Б) с каждым последующим циклом измерения. Такой противоположный характер поведения ВАХ связан с изменениями электрического сопротивления оксидного слоя за счёт движения собственных дефектов (например, кислородных вакансий [24]) под действием $U(t)$, приложенного к исследуемой структуре $Zr/ZrO_2/Au$. Таким образом, различные картины распределения дефектов в нанотубулярном массиве соответствуют ряду IRS состояний для изготовленных мемристоров (рис. 3).

Для исследуемой $Zr/ZrO_2/Au$ структуры выполнены оценки статического электрического сопротивления R в различных состояниях при $U = 5$ В: $R_{HRS} = (13 \pm 1)$ кОм (состояние IRS с наибольшим сопротивлением), а

значения R_{IRS} варьируются от 5.2 до 0.35 кОм. При этом отношение $R_{HRS} / R_{LRS} = 2-37$, что свидетельствует о широком диапазоне изменения проводимости исследуемой мемристивной структуры.

Заключение

В настоящей работе методом анодирования выполнен синтез нанотубулярных структур ZrO_2 . С использованием сканирующей электронной микроскопии показано, что полученный оксидный слой имеет толщину 3 нм и состоит из нанотрубок с внешним диаметром 25 нм.

Методом масочного магнетронного изготовлены мемристоры диаметром 1 мм со слоистой $Zr/ZrO_2/Au$ структурой. Для полученных мемристивных образцов исследованы ВАХ в полных циклах резистивного переключения при варьировании параметров приложенного гармонического напряжения. На основании анализа экспериментальных данных предложена эквивалентная электрическая схема с односторонней проводимостью в виде последовательного включения диода Шоттки и мемристора. Выполнены оценки электрических сопротивлений для мемристоров в высокоомном $R_{HRS} = (13.0 \pm 1)$ кОм и промежуточных состояниях $R_{IRS} = (0.35-5.2)$ кОм. На основании полученных отношений $R_{HRS} / R_{IRS} = 2-37$ сделан вывод о высокой степени изменения проводимости изготовленной мемристивной структуры $Zr/ZrO_2/Au$.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Jo S.H. Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems / S.H. Jo, T. Chang, I. Ebong [et al.] // Nano Letters. — Vol. 10. — 2010. — P. 1297-1301.
2. Yang J.J. Memristive Devices for Computing / J.J. Yang, D.B. Strukov, D.R. Stewart // Nature Nanotechnology. — Vol. 8. — 2013. — P. 13-24.
3. Indiveri G. Integration of Nanoscale Memristor Synapses in Neuromorphic Computing Architectures / G. Indiveri, B. Linares-Barranco, R. Legenstein [et al.] // Nanotechnology. — Vol. 24. — 2013. — P. 384010.
4. Carpenter G.A. Fuzzy ARTMAP: A Neural Network Architecture for Incremental Supervised Learning of Analog Multidimensional Maps / G.A. Carpenter, S. Grossberg, N. Markuzon [et al.] // IEEE Transactions on Neural Networks. — Vol. 3. — 1992. — P. 698-713.
5. Kundozerova T. Resistance Switching in Metal Oxide Thin Films and its Memory Application / T. Kundozerova, G. Stefanovich // Applied Mechanics and Materials. — Vol. 346. — 2013. — P. 29-34.
6. Miller K. Memristive Behavior in Thin Anodic Titania / K. Miller, K.S. Nalwa, A. Bergerud // IEEE Electron Device Letters. — Vol. 31. — 2010. — P. 737-739.
7. Yoo J.E. Highly Ordered TiO₂ Nanotube-stumps with Memristive Response / J.E. Yoo, K. Lee, A. Tighineanu [et al.] // Electrochemistry Communications. — Vol. 34. — 2013. — P. 177-180.
8. Вохминцев А.С. Мемристивный эффект в нанотубулярном слое анодированного диоксида титана / А.С. Вохминцев, И.А. Вайнштейн, Р.В. Камалов [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — Т. 78. — 2014. — С. 1176-1179.
9. Ремпель А.А. Нанотрубки диоксида титана: синтез, структура, свойства и применение / А.А. Ремпель, А.А. Валева, А.С. Вохминцев [и др.] // Успехи химии. — Т. 90. — 2021. — С. 1397-1414.
10. Albu S.P. Self-organized TiO₂ Nanotube Arrays: Critical Effects on Morphology and Growth / S.P. Albu, P. Roy, S. Virtanen [et al.] // Israel Journal of Chemistry. — Vol. 50. — 2010. — P. 453-467.
11. Card H.C. Studies of Tunnel MOS Diodes. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes / H.C. Card, E.H. Rhoderick // Journal of Physics D: Applied Physics. — Vol. 4. — 1971. — P. 1589-1602.
12. Petrenyov I.A. Conduction Mechanisms in Memristors Based on Nanotubular Arrays of Zirconium Oxide / I.A. Petrenyov, A.S. Vokhmintsev, R.V. Kamalov [et al.] // AIP Conference Proceedings. — Vol. 2174. — 2019. — P. 020242.
13. Gryaznov A.O. Automatized Complex for Measuring the Electrical Properties of MIM Structures / A.O. Gryaznov, I.B. Dorosheva, A.S. Vokhmintsev [et al.] // Proceedings of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). — 2016. — P. 1-4.
14. Vokhmintsev A.S. Unidirectional Synapse-like Behavior of Zr/ZrO₂-NT/Au Layered Structure / A.S. Vokhmintsev, R.V. Kamalov, A.V. Kozhevina [et al.] // Proceedings – 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2018. — 2018. — P. 348-351.
15. Kozhevina A.V. Optical Absorption Edge Parameters of Zirconium Dioxide Nanotubular Structures / A.V. Kozhevina, A.S. Vokhmintsev, R.V. Kamalov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — Vol. 917. — 2017. — P. 062031.
16. Eastman D.E. Photoelectric Work Functions of Transition, Rare-Earth, and Noble Metals / D.E. Eastman // Physical Review B. — Vol. 2. — 1970. — P. 1-2.
17. Knizhnik A.A. Impact of Oxygen on the Work Functions of Mo in Vacuum and on ZrO₂ / A.A. Knizhnik, I.M. Iskandarova, A.A. Bagatur'yants [et al.] // Journal of Applied Physics. — Vol. 97. — 2005. — P. 064911.

18. Lim E. Conduction Mechanism of Valence Change Resistive Switching Memory: A Survey / E. Lim, R. Ismail // *Electronics*. — Vol. 4. — 2015. — P. 586-613.
19. Wang M.-T. Electrical Conduction Mechanism in High-dielectric-constant ZrO₂ Thin Films / M.-T. Wang, T.-H. Wang, J.Y. Lee // *Microelectronics Reliability*. — Vol. 45. — 2005. — P. 969—972.
20. Shirvington P.J. Electron Conduction through Oxide Films on Zircaloy-2 / P.J. Shirvington // *Journal of Nuclear Materials*. — Vol. 37. — 1970. — P. 177-202.
21. Jōgi I. Atomic Layer Deposition of High Capacitance Density Ta₂O₅-ZrO₂ Based Dielectrics for Metal-insulator-metal Structures / I. Jōgi, K. Kukli, M. Ritala [et al.] // *Microelectronic Engineering*. — Vol. 87. — 2010. — P. 144-149.
22. Kim S. Giant and Stable Conductivity Switching Behaviors in ZrO₂ Films Deposited by Pulsed Laser Depositions / S. Kim, I. Byun, I. Hwang [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. — Vol. 44. — 2005. — P. L345-L347.
23. Petrenyov I.A. Nanostructural Features of Anodic Zirconia Synthesized Using Different Temperature Modes / I.A. Petrenyov, R.V. Kamalov, A.S. Vokhmintsev [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — Vol. 1124. — 2018. — P. 022004.
24. Vokhmintsev A.S. Effect of Annealing on Photoluminescence Properties in Zirconium Dioxide Nanotubes / A.S. Vokhmintsev, R.V. Kamalov, I.A. Petrenyov [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. — Vol. 2313. — 2020. — P. 5-9.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Jo S.H. Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems / S.H. Jo, T. Chang, I. Ebong [et al.] // *Nano Letters*. — Vol. 10. — 2010. — P. 1297-1301.
2. Yang J.J. Memristive Devices for Computing / J.J. Yang, D.B. Strukov, D.R. Stewart // *Nature Nanotechnology*. — Vol. 8. — 2013. — P. 13-24.
3. Indiveri G. Integration of Nanoscale Memristor Synapses in Neuromorphic Computing Architectures / G. Indiveri, B. Linares-Barranco, R. Legenstein [et al.] // *Nanotechnology*. — Vol. 24. — 2013. — P. 384010.
4. Carpenter G.A. Fuzzy ARTMAP: A Neural Network Architecture for Incremental Supervised Learning of Analog Multidimensional Maps / G.A. Carpenter, S. Grossberg, N. Markuzon [et al.] // *IEEE Transactions on Neural Networks*. — Vol. 3. — 1992. — P. 698-713.
5. Kundozerova T. Resistance Switching in Metal Oxide Thin Films and its Memory Application / T. Kundozerova, G. Stefanovich // *Applied Mechanics and Materials*. — Vol. 346. — 2013. — P. 29-34.
6. Miller K. Memristive Behavior in Thin Anodic Titania / K. Miller, K.S. Nalwa, A. Bergerud // *IEEE Electron Device Letters*. — Vol. 31. — 2010. — P. 737-739.
7. Yoo J.E. Highly Ordered TiO₂ Nanotube-stumps with Memristive Response / J.E. Yoo, K. Lee, A. Tighineanu [et al.] // *Electrochemistry Communications*. — Vol. 34. — 2013. — P. 177-180.
8. Vohminceva A.S. Memristivnyj effekt v nanotubulyarnom sloe anodirovannogo dioksida titana [Memristive Effect in a Nanotubular Layer of Anodized Titanium Dioxide] / A.S. Vohminceva, I.A. Vajnshtejn, R.V. Kamalov [et al.] // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya fizicheskaya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The Series is Physical]. — V. 78. — 2014. — P. 1176-1179 [in Russian].
9. Rempel' A.A. Nanotrubki dioksida titana: sintez, struktura, svojstva i primenenie [Titanium Dioxide Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Application] / A.A. Rempel', A.A. Valeeva, A.S. Vohminceva [et al.] // *Uspekhi himii* [Advances in Chemistry]. — V. 90. — 2021. — P. 1397-1414 [in Russian].
10. Albu S.P. Self-organized TiO₂ Nanotube Arrays: Critical Effects on Morphology and Growth / S.P. Albu, P. Roy, S. Virtanen [et al.] // *Israel Journal of Chemistry*. — Vol. 50. — 2010. — P. 453-467.
11. Card H.C. Studies of Tunnel MOS Diodes. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes / H.C. Card, E.H. Rhoderick // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — Vol. 4. — 1971. — P. 1589-1602.
12. Petrenyov I.A. Conduction Mechanisms in Memristors Based on Nanotubular Arrays of Zirconium Oxide / I.A. Petrenyov, A.S. Vokhmintsev, R.V. Kamalov [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. — Vol. 2174. — 2019. — P. 020242.
13. Gryaznov A.O. Automated Complex for Measuring the Electrical Properties of MIM Structures / A.O. Gryaznov, I.B. Dorosheva, A.S. Vokhmintsev [et al.] // *Proceedings of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. — 2016. — P. 1-4.
14. Vokhmintsev A.S. Unidirectional Synapse-like Behavior of Zr/ZrO₂-NT/Au Layered Structure / A.S. Vokhmintsev, R.V. Kamalov, A.V. Kozhevina [et al.] // *Proceedings – 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2018*. — 2018. — P. 348-351.
15. Kozhevina A.V. Optical Absorption Edge Parameters of Zirconium Dioxide Nanotubular Structures / A.V. Kozhevina, A.S. Vokhmintsev, R.V. Kamalov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — Vol. 917. — 2017. — P. 062031.
16. Eastman D.E. Photoelectric Work Functions of Transition, Rare-Earth, and Noble Metals / D.E. Eastman // *Physical Review B*. — Vol. 2. — 1970. — P. 1-2.
17. Knizhnik A.A. Impact of Oxygen on the Work Functions of Mo in Vacuum and on ZrO₂ / A.A. Knizhnik, I.M. Iskandarova, A.A. Bagatur'yants [et al.] // *Journal of Applied Physics*. — Vol. 97. — 2005. — P. 064911.
18. Lim E. Conduction Mechanism of Valence Change Resistive Switching Memory: A Survey / E. Lim, R. Ismail // *Electronics*. — Vol. 4. — 2015. — P. 586-613.
19. Wang M.-T. Electrical Conduction Mechanism in High-dielectric-constant ZrO₂ Thin Films / M.-T. Wang, T.-H. Wang, J.Y. Lee // *Microelectronics Reliability*. — Vol. 45. — 2005. — P. 969—972.
20. Shirvington P.J. Electron Conduction through Oxide Films on Zircaloy-2 / P.J. Shirvington // *Journal of Nuclear Materials*. — Vol. 37. — 1970. — P. 177-202.
21. Jōgi I. Atomic Layer Deposition of High Capacitance Density Ta₂O₅-ZrO₂ Based Dielectrics for Metal-insulator-metal Structures / I. Jōgi, K. Kukli, M. Ritala [et al.] // *Microelectronic Engineering*. — Vol. 87. — 2010. — P. 144-149.

22. Kim S. Giant and Stable Conductivity Switching Behaviors in ZrO₂ Films Deposited by Pulsed Laser Depositions / S. Kim, I. Byun, I. Hwang [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. — Vol. 44. — 2005. — P. L345-L347.
23. Petrenyov I.A. Nanostructural Features of Anodic Zirconia Synthesized Using Different Temperature Modes / I.A. Petrenyov, R.V. Kamalov, A.S. Vokhmintsev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — Vol. 1124. — 2018. — P. 022004.
24. Vokhmintsev A.S. Effect of Annealing on Photoluminescence Properties in Zirconium Dioxide Nanotubes / A.S. Vokhmintsev, R.V. Kamalov, I.A. Petrenyov [et al.] // AIP Conference Proceedings. — Vol. 2313. — 2020. — P. 5-9.