

Нестационарная модель массопереноса кислородных вакансий и захваченных электронов для определения влияния температуры на электрофизические свойства металлооксидного мемристора

Александр Николаевич Бусыгин[✉], Бауржан Хайрулович Габдулин,
Сергей Юрьевич Удовиченко, Никита Анатольевич Шулаев,
Александр Дмитриевич Писарев, Абдулла Хайдар Абдо Ибрагим

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: a.n.busygin@utmn.ru[✉]

Аннотация. Предложена нестационарная одномерная физико-математическая модель массопереноса кислородных вакансий и захваченных электронов при постоянном электрическом поле, которая позволяет точнее определить влияния температуры на электрофизические свойства металлооксидного мемристора по сравнению со стационарной моделью. В отличие от известных моделей, она содержит нестационарные уравнения непрерывности для концентрации захваченных электронов и их плотности тока и соответствующие граничные условия. Разработанная модель позволяет корректно учесть переходные процессы, которые происходят в условиях построения вольт-амперной характеристики мемристора при разных скоростях изменения напряжения во времени. Расчетные значения концентраций вакансий кислорода различаются для нестационарной и известной стационарной модели. В первом случае также наблюдается сильная зависимость профиля концентрации вакансий кислорода от температуры активного слоя мемристора. Существенные отличия распределений концентраций вакансий по толщине пленки наблюдаются при температуре пленки, равной 600 К. Показано, что нестационарная модель точнее воспроизводит экспериментальную вольт-амперную характеристику изготовленного мемристора. Она позволяет оценить время установления стационарного распределения концентрации зарядов и анализировать процесс резистивного переключения при разной скорости изменения напряжения на мемристоре. Представленная модель востребована при численном моделировании процессов

обработки сигналов в больших мемристорных массивах, используемых в нейроморфных устройствах.

Ключевые слова: одномерная модель, нестационарный тепло- и массоперенос, оксид металла, кислородные вакансии, захваченные электроны, вольт-амперная характеристика, мемристор, температура оксидного слоя

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FEWZ-2024-0020).

Цитирование: Бусыгин А. Н., Габдулин Б. Х., Удовиченко С. Ю., Шулаев Н. А., Писарев А. Д., Ибрагим А. Х. А. 2024. Нестационарная модель массопереноса кислородных вакансий и захваченных электронов для определения влияния температуры на электрофизические свойства металлооксидного мемристора // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 3 (39). С. 37–49. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-3-37-49>

Поступила 17.07.2024; одобрена 20.09.2024; принята 02.10.2024

A nonstationary model of mass transfer of oxygen vacancies and trapped electrons for determination of temperature influence on properties of a metal oxide memristor

Alexander N. Busygin , **Baurzhan H. Gabdulin**, **Sergey Yu. Udovichenko**, **Nikita A. Shulaev**, **Alexander D. Pisarev**, **Abdulla H. A. Ebrahim**

University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: a.n.busygin@utmn.ru 

Abstract. A non-stationary one-dimensional physico-mathematical model of the mass transfer of oxygen vacancies and trapped electrons under a constant electric field is presented. The model provides a more accurate determination of the temperature effect on the electrophysical properties of a metal oxide memristor in comparison with the stationary model. Unlike the known models, the new one includes non-stationary continuity equations for the concentrations and current density of trapped electrons. The developed model correctly considers transient processes that occur under the conditions of measuring the current-voltage characteristic of the memristor at different voltage sweep rates. The obtained profiles of vacancy concentrations

using the developed non-stationary and known stationary models are quantitatively different and have a strong dependence on the temperature of the active layer of the memristor. Significant differences in the distribution of vacancy concentrations across the film thickness are observed at a film temperature of 600 K. The results show that the non-stationary model more accurately reproduces the experimental current-voltage characteristic of the manufactured memristor, allowing to estimate the switching time to a stable state and to analyze the process of resistive switching of the memristor at different voltage sweep rates. The developed model is helpful in numerical simulation of signal processing routines in large memristor arrays used in neuromorphic devices.

Keywords: one-dimensional model, nonstationary heat and mass transfer, metal oxide, oxygen vacancies, trapped electrons, current-voltage characteristic, memristor, oxide layer temperature

Acknowledgements: the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FEWZ-2024-0020).

Citation: Busygin, A. N., Gabdulin, B. H., Udovichenko, S. Yu., Shulaev, N. A., Pisarev, A. D., & Ebrahim, A. H. A. (2024). A nonstationary model of mass transfer of oxygen vacancies and trapped electrons for determination of temperature influence on properties of a metal oxide memristor. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(3), 37–49. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-3-37-49>

Received Jul. 17, 2024; Reviewed Sep. 20, 2024; Accepted Oct. 2, 2024

Введение

В ряде работ [Larentis и др., 2012; Kim и др., 2013, 2014; Basnet и др., 2020; Parit и др., 2021] предложены физико-математические модели массопереноса зарядов в металлооксидных мемристорах. В этих моделях концентрация кислородных вакансий рассчитывается с помощью нестационарного уравнения непрерывности, а плотность тока — с помощью стационарного уравнения непрерывности. При этом в них не учитывается нестационарный процесс переноса в электрическом поле захваченных в ловушки (кислородные вакансии) электронов. Кроме этого, в этих моделях вместо уравнения Пуассона для электрического поля использовано уравнение Лапласа, обоснованием применимости которого является малая электропроводность диэлектрического оксида металла.

Использование рядом авторов [Larentis и др., 2012; Kim и др., 2013; Dirkmann и др., 2018; Basnet и др., 2020; Parit и др., 2021] стационарного уравнения непрерывности плотности тока электронов является необоснованным. Это обстоятельство не позволяет корректно учесть переходные процессы, которые происходят в условиях построения вольт-амперной характеристики (ВАХ) мемристора при различных скоростях развертки напряжения во времени.

В статье А. А. Чернова [Chernov и др., 2017] сформулирована достаточно полная модель массопереноса зарядов в структуре «металл — оксид — металл». Однако модель не учитывает диффузию вакансий и ионов кислорода, вызванную градиентом их концентрации в активном слое мемристора.

Ранее А. Х. А. Ибрагим, С. Ю. Удовиченко, А. Н. Бусыгин и др. [Ибрагим, Удовиченко, 2020; Ибрагим и др., 2022; Busygin и др., 2023] на основе системы уравнений массопереноса А. А. Чернова [Chernov и др., 2017] предложили менее сложную стационарную модель эффекта резистивного переключения в мемристоре на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Модель учитывала наличие градиента концентрации ионов и вакансий кислорода в оксидном слое.

Другими авторами [Sato и др., 2007; Kim и др., 2013; Mazady, Anwar, 2014; Graves и др., 2017; Pahinkar и др., 2020; Patil и др., 2020; Shen и др., 2021] исследовано влияние эффектов массопереноса на профиль концентрации вакансий кислорода.

Целью настоящей работы является развитие физико-математической модели массопереноса при транспорте зарядов в постоянном электрическом поле металлооксидного мемристора [Ибрагим и др., 2022]. Модель дополнена нестационарными уравнениями непрерывности концентрации и плотности тока электронов, она позволяет точнее определить влияние температуры на электрофизические свойства металлооксидного мемристора.

Нестационарная система уравнений модели

Система нестационарных уравнений массопереноса зарядов в постоянном электрическом поле оксидного слоя мемристора имеет вид:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \vec{\nabla}(D\vec{\nabla}N - N\vec{V}_E) + (N_{\max} - N)f_0 \exp\left(-\frac{W_g - \sqrt{\frac{q^3 E}{\pi \epsilon \epsilon_0}}}{kT}\right) - \\ - NN_{ox} V_{Eox} \frac{q}{4\epsilon \epsilon_0 E}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_t}{\partial t} = -s\vec{\nabla}\left(n_t\left(1 - \frac{n_t}{N}\right)v_{tun}\frac{\vec{E}}{E}\right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(n + n_t)}{\partial t} = -\frac{1}{e}\vec{\nabla}\vec{J}, \quad \vec{J} = esn_t\left(1 - \frac{n_t}{N}\right)v_{tun}\frac{\vec{E}}{E}, \quad (3)$$

$$\vec{\nabla}\vec{E} = 0, \quad (4)$$

где второй член уравнения (1) отвечает за генерацию пар ион-вакансий кислорода, третий член — за скорость их рекомбинации; N , n_t — концентрация вакансий кислорода и захваченных электронов. Нестационарные уравнения для электронов (2) и (3)

получены в работе Д. Р. Исламова и др. [Islamov и др., 2017]. Остальные обозначения в уравнениях такие же, как в статье А. Х. А. Ибрагима и др. [2022].

Рассматривается одномерное движение зарядов в оксиде металла под действием электрического поля, приложенного между двумя плоскими электродами.

Граничными условиями для уравнения непрерывности концентрации вакансий кислорода (1) являются непрозрачная граница вблизи одного электрода и фиксированная концентрация вблизи другого электрода:

$$\left(D \frac{\partial N}{\partial z} - NV_E\right)\Big|_{z=0} = 0, \quad N|_{z=d} = N_{\max} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \quad (5)$$

где z — вертикальная координата, отсчитываемая относительно поверхности одного из электродов.

Вблизи электрода с низким потенциалом граничное условие для уравнения непрерывности концентрации захваченных электронов (2) имеет вид:

$$\left.\frac{\partial n_t}{\partial t}\right|_{z=0} = v_{inj}(N - n_t) - v_{ion}n_t - s \frac{\partial}{\partial z} \left(n_t \left(1 - \frac{n_t}{N}\right) P_{tun}\right), \quad (6)$$

первый и второй члены в котором описаны А. А. Пильником и др. [Pil'nik и др., 2020], а третий — А. А. Черновым [Chernov и др., 2017].

Граничное условие для уравнения непрерывности концентрации захваченных электронов (2) вблизи электрода с высоким потенциалом аналогично условию (6), в последнем члене правой части которого необходимо изменить знак на противоположный.

Уравнения модели решались с применением метода конечных разностей на равномерной пространственной сетке. Шаг во времени также фиксирован.

Процедура расчета ВАХ мемристора является циклической и включает расчет профилей концентрации вакансий и ионов кислорода, концентрации захваченных электронов, определение плотности тока захваченных электронов по формуле (3) на границе активного слоя и заземленного электрода.

Численный расчет уравнений модели проводился для оксида тантала. Соответствующие константы взяты из работы А. Н. Бусыгина и др. [Busygin и др., 2023].

Результаты численного моделирования и обсуждение

Расчетные профили концентрации вакансий кислорода по толщине активного слоя мемристора различаются для стационарного [Busygin и др., 2023] и нестационарного случая массопереноса (рис. 1).

Видно, что полученные профили концентраций вакансий с помощью разработанной нестационарной и известной [Busygin и др., 2023] стационарной модели количественно отличаются. Для оксида металла с большей толщиной это различие более существенное.

Из рис. 2 следует, что с ростом времени нестационарный профиль концентрации вакансий перемещается в сторону отрицательно заряженного электрода мемристора и за 91 мкс достигает фронта стационарного профиля.

Общий вид профиля концентрации вакансий по толщине слоя в закрытом и открытом состоянии мемристора на рис. 2 аналогичен соответствующему профилю, полученному М. Номаном и др. [Noman и др., 2011].

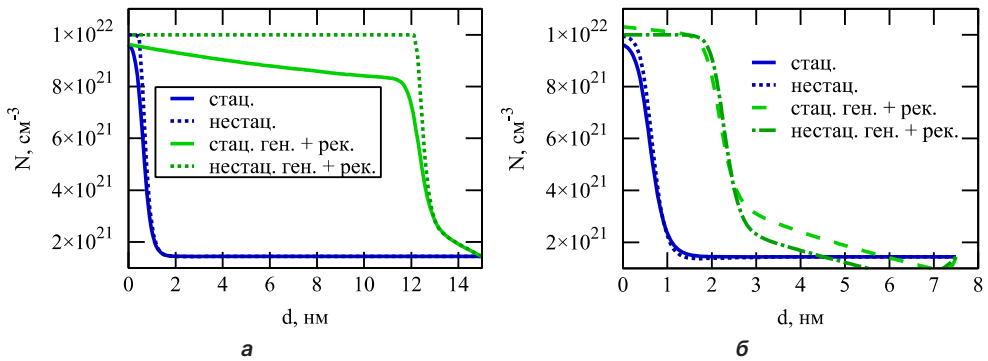


Рис. 1. Распределение концентрации вакансий по толщине оксидного слоя:

а — при $d = 15$ нм, $U = 3$ В; б — при $d = 7,5$ нм, $U = 1,5$ В

Fig. 1. Vacancy concentration distribution over oxide layer: а — $d = 15$ nm, $U = 3$ V;

б — $d = 7.5$ nm, $U = 1.5$ V

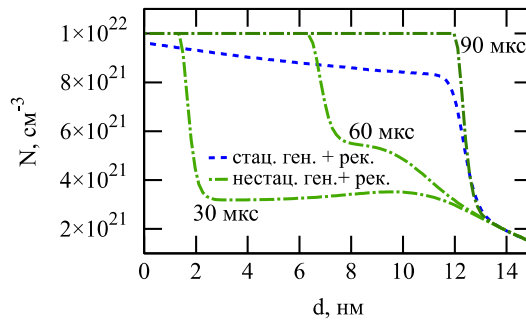


Рис. 2. Распределения концентрации вакансий по толщине оксидного слоя при $d = 15$ нм, $U = 3$ В в разные моменты времени с учетом процессов генерации и рекомбинации

Fig. 2. Concentration distribution of oxygen vacancies over oxide layer thickness at $d = 15$ nm, $U = 3$ V at different time moments with consideration of generation and recombination processes

Из рис. 3 следует, что существенные отличия распределений концентраций вакансий по толщине пленки, построенные с помощью разработанной нестационарной и известной стационарной модели, наблюдаются при температуре пленки 600 К. При температуре 300 и 900 К соответствующие результаты нестационарной и стационарной модели массопереноса кислородных вакансий практически не отличаются.

На рис. 4 для сравнения показаны кривые ВАХ, соответствующие открытию мемристора: 1 — экспериментальная [Kuzmichev, Markeev, 2021] (при скорости изменения

напряжения 5 В/с); 2 — расчетная при стационарном профиле концентрации вакансий [Busygin и др., 2023]; 3 — ВАХ в нестационарном режиме. Ток ($I = J\pi D^2/4$) пересчитан из расчетной плотности тока (J) через круглый электрод диаметром (D), равным 50 мкм.

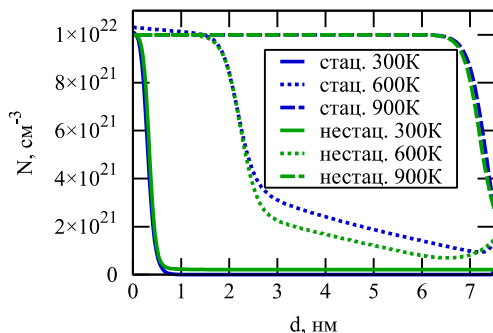


Рис. 3. Профиль распределения концентрации вакансий по толщине оксидного слоя мемристора в зависимости от его температуры

Fig. 3. Vacancy concentration distribution over oxide layer depending on its temperature

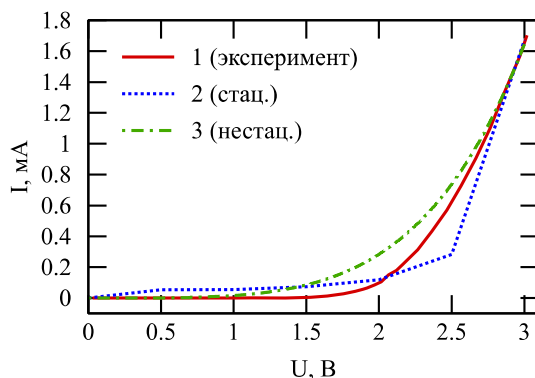


Рис. 4. ВАХ при открытии мемристора

Fig. 4. The current-voltage characteristic during memristor opening

Кроме этого, ток для кривой 3 получен при расчете профиля концентрации захваченных электронов по формулам (2), в отличие от использования средних значений для кривой 2. Из рис. 4 следует, что кривая ВАХ, соответствующая нестационарному режиму резистивного переключения мемристора, расположена ближе к экспериментальной кривой, чем кривая в случае стационарного режима.

На рис. 5 представлены кривые ВАХ открытия мемристора при различной температуре оксидного слоя.

Видно, что расчетный ток электронов увеличивается с ростом температуры. Это вызвано двумя процессами: 1) увеличивается общее количество вакансий в пленке за счет более интенсивной их генерации, 2) растет вероятность туннелирования захваченных

электронов между вакансиями. Близость экспериментальной и расчетной кривой ВАХ при определенной температуре позволяет косвенно оценить реальную температуру пленки активного слоя мемристора.

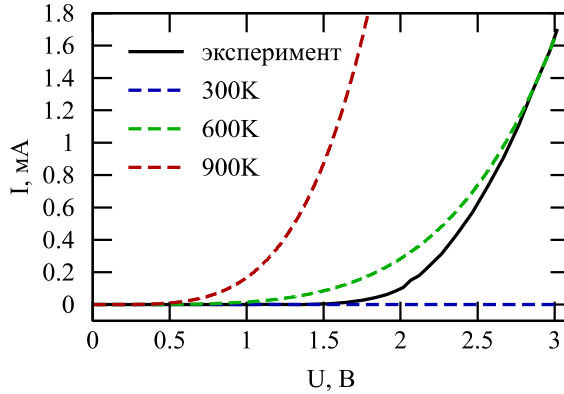


Рис. 5. Влияние температуры оксида металла на ВАХ мемристора

Fig. 5. The metal oxide temperature influence on the memristor current-voltage characteristic

Заключение

Предложена одномерная физико-математическая модель процесса массопереноса вакансий кислорода и захваченных вакансиями электронов в мемристоре с активным слоем из оксида переходного металла. Модель дополняет уравнения, предложенные А. Х. А. Ибрагимов и др. [2022] с учетом процессов генерации и рекомбинации вакансий и ионов кислорода, нестационарными уравнениями непрерывности для концентрации и плотности тока захваченных электронов в постоянном электрическом поле.

Обе модели (известная стационарная [Busygin и др., 2023] и предложенная нестационарная модель) имеют количественное отличие в расчетных профилях концентрации кислородных вакансий при сильной зависимости от температуры. При температуре активного слоя 600 К наблюдается значительное отличие распределений концентрации вакансий кислорода по толщине пленки. При температуре менее 300 и более 900 К численное моделирование без потери точности можно выполнять с использованием стационарного уравнения непрерывности для кислородных вакансий. Учет нестационарного процесса массопереноса вакансий кислорода позволяет оценить время установления стационарного резистивного состояния мемристора с помощью предложенной модели. С ростом времени нестационарный профиль концентрации вакансий перемещается в сторону отрицательно заряженного электрода мемристора и за 91 мкс достигает фронта стационарного профиля.

Нестационарная модель по сравнению со стационарной точнее воспроизводит экспериментальную ВАХ изготовленного мемристора. Расчетный ток электронов увеличивается с ростом температуры, что вызвано увеличением общего количества вакансий

в пленке за счет более интенсивной их генерации, а также ростом вероятности туннелирования захваченных электронов между вакансиями.

Представленная корректная модель востребована при численном моделировании процессов обработки сигналов в больших мемристорных массивах, разрабатываемых в нейроморфных устройствах.

Список источников

- Ибрагим А. Х., Удовиченко С. Ю. 2020. Математическое моделирование резистивных состояний и динамического переключения мемристора на основе оксида металла // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 6. № 2 (22). С. 127–144. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-2-127-144>
- Ибрагим А. Х. А., Бусыгин А. Н., Удовиченко С. Ю. 2022. Математическое моделирование резистивного переключения в мемристоре на основе полной модели процессов массопереноса кислородных вакансий и ионов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 8. № 2 (30). С. 198–214. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-2-198-214>
- Basnet P., Pahinkar D. G., West M. P., Perini C. J., Graham S., Vogel E. M. 2020. Substrate dependent resistive switching in amorphous-HfO_x memristors: an experimental and computational investigation // Journal of Materials Chemistry C. Vol. 8. No. 15. Pp. 5092–5101. <http://dx.doi.org/10.1039/C9TC06736A>
- Busygin A. N., Udovichenko S. Yu., Ebrahim A. H. A., Bobylev A. N., Gubin A. A. 2023. Mathematical model of metal–oxide memristor resistive switching based on full physical model of heat and mass transfer of oxygen vacancies and ions // physica status solidi (a). Vol. 220. No. 11. Article 2200478. <https://doi.org/10.1002/pssa.202200478>
- Chernov A. A., Islamov D. R., Pil'nik A. A., Perevalov T. V., Gritsenko V. A. 2017. Three-dimensional non-linear complex model of dynamic memristor switching // ECS Transactions. Vol. 75. No. 32. Pp. 95–104. <https://dx.doi.org/10.1149/07532.009Sec7>
- Dirkmann S., Kaiser J., Wenger C., Mussenbrock T. 2018. Filament growth and resistive switching in hafnium oxide memristive devices // ACS Applied Materials & Interfaces. Vol. 10. No. 17. Pp. 14857–14868. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b19836>
- Graves C. E., Dávila N., Merced-Grafals E. J., Lam S.-T., Strachan J. P., Williams R. S. 2017. Temperature and field-dependent transport measurements in continuously tunable tantalum oxide memristors expose the dominant state variable // Applied Physics Letters. Vol. 110. No. 12. Article 123501. <https://doi.org/10.1063/1.4978757>
- Islamov D. R., Gritsenko V. A., Chin A. 2017. Charge transport in thin hafnium and zirconium oxide films // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. Vol. 53. No. 2. Pp. 184–189. <https://doi.org/10.3103/S8756699017020121>
- Kim S., Kim S.-J., Kim K. M., Lee S. R., Chang M., Cho E., Kim Y.-B., Kim C. J., In Chung, U., Yoo In-K. 2013. Physical electro-thermal model of resistive switching in bi-layered resistance-change memory // Scientific Reports. Vol. 3. No. 1. Article 1680. <https://doi.org/10.1038/srep01680>
- Kim S., Choi S. H., Lu W. 2014. Comprehensive physical model of dynamic resistive switching in an oxide memristor // ACS Nano. Vol. 8. No. 3. Pp. 2369–2376. <https://doi.org/10.1021/nn405827t>

- Kuzmichev D. S., Markeev A. M. 2021. Neuromorphic properties of forming-free non-filamentary $\text{TiN}/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Ta}$ structures with an asymmetric current–voltage characteristic // *Nanobiotechnology Reports*. Vol. 16. No. 6. Pp. 804–810. <https://doi.org/10.1134/S2635167621060136>
- Larentis S., Nardi F., Balatti S., Gilmer D. C., Ielmini D. 2012. Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM — Part II: Modeling // *IEEE Transactions on Electron Devices*. Vol. 59. No. 9. Pp. 2468–2475. <https://doi.org/10.1109/TED.2012.2202320>
- Mazady A., Anwar M. 2014. Memristor: Part I — The underlying physics and conduction mechanism // *IEEE Transactions on Electron Devices*. Vol. 61. No. 4. Pp. 1054–1061. <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2304436>
- Noman M., Jiang W., Salvador P. A., Skowronski M., Bain J. A. 2011. Computational investigations into the operating window for memristive devices based on homogeneous ionic motion // *Applied Physics A*. Vol. 102. No. 4. Pp. 877–883. <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6270-y>
- Pahinkar D. G., Basnet P., West M. P., Zivasatienraj B., Weidenbach A., Doolittle W. A., Vogel E., Graham S. 2020. Experimental and computational analysis of thermal environment in the operation of HfO_2 memristors // *AIP Advances*. Vol. 10. No. 3. Article 035127. <https://doi.org/10.1063/1.5141347>
- Parit A. K., Yadav M. S., Gupta A. K., Mikhaylov A., Rawat B. 2021. Design and modeling of niobium oxide-tantalum oxide based self-selective memristor for large-scale crossbar memory // *Chaos, Solitons & Fractals*. Vol. 145. Article 110818. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110818>
- Patil P. J., Ahir N. A., Yadav S., Revadekar C. C., Khot K. V., Kamat R. K., Dongale T. D., Kim D. K. 2020. Effect of conductive filament temperature on ZrO_2 based resistive random access memory devices // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. Vol. 12. No. 2. Article 02008. [https://doi.org/10.21272/JNEP.12\(2\).02008](https://doi.org/10.21272/JNEP.12(2).02008)
- Pil'nik A. A., Chernov A. A., Islamov D. R. 2020. Charge transport mechanism in dielectrics: drift and diffusion of trapped charge carriers // *Scientific Reports*. Vol. 10. No. 1. Article 15759. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72615-1>
- Sato Y., Kinoshita K., Aoki M., Sugiyama Y. 2007. Consideration of switching mechanism of binary metal oxide resistive junctions using a thermal reaction model // *Applied Physics Letters*. Vol. 90. No. 3. Article 033503. <https://doi.org/10.1063/1.2431792>
- Shen W., Kumar S., Kumar S. 2021. Experimentally calibrated electro-thermal modeling of temperature dynamics in memristors // *Applied Physics Letters*. Vol. 118. No. 10. Article 103505. <https://doi.org/10.1063/5.0039797>

References

- Ebrahim, A. H., & Udovichenko, S. Yu. (2020). Mathematical modeling of resistive states and dynamic switching of a metal oxide memristor. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 6(2), 127–144. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-2-127-144> [In Russian]
- Ebrahim, A. H. A., Busygin, A. N., & Udovichenko, S. Yu. (2022). Mathematical modeling of memristor resistive switching based on mass transfer full model of oxygen vacancies and ions. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 8(2), 198–214. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-2-198-214> [In Russian]

- Basnet, P., Pahinkar, D. G., West, M. P., Perini, C. J., Graham, S., & Vogel, E. M. (2020). Substrate dependent resistive switching in amorphous-HfO₂ memristors: an experimental and computational investigation. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(15), 5092–5101. <http://dx.doi.org/10.1039/C9TC06736A>
- Busygin, A. N., Udovichenko, S. Yu., Ebrahim, A. H. A., Bobylev, A. N., Gubin, A. A. (2023). Mathematical model of metal–oxide memristor resistive switching based on full physical model of heat and mass transfer of oxygen vacancies and ions. *physica status solidi (a)*, 220(11), Article 2200478. <https://doi.org/10.1002/pssa.202200478>
- Chernov, A. A., Islamov, D. R., Pil'nik, A. A., Perevalov, T. V., & Gritsenko, V. A. (2017). Three-dimensional non-linear complex model of dynamic memristor switching. *ECS Transactions*, 75(32), 95–104. <https://dx.doi.org/10.1149/07532.009Secst>
- Dirkmann, S., Kaiser, J., Wenger, C., & Mussenbrock, T. (2018). Filament growth and resistive switching in hafnium oxide memristive devices. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(17), 14857–14868. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b19836>
- Graves, C. E., Dávila, N., Merced-Grafals, E. J., Lam, S.-T., Strachan, J. P., & Williams, R. S. (2017). Temperature and field-dependent transport measurements in continuously tunable tantalum oxide memristors expose the dominant state variable. *Applied Physics Letters*, 110(12), Article 123501. <https://doi.org/10.1063/1.4978757>
- Islamov, D. R., Gritsenko, V. A., & Chin, A. (2017). Charge transport in thin hafnium and zirconium oxide films. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53(2), 184–189. <https://doi.org/10.3103/S8756699017020121>
- Kim, S., Kim, S.-J., Kim, K. M., Lee, S. R., Chang, M., Cho, E., Kim, Y.-B., Kim, C. J., In Chung, U., & Yoo, In-K. (2013). Physical electro-thermal model of resistive switching in bi-layered resistance-change memory. *Scientific Reports*, 3(1), Article 1680. <https://doi.org/10.1038/srep01680>
- Kim, S., Choi, S. H., & Lu, W. (2014). Comprehensive physical model of dynamic resistive switching in an oxide memristor. *ACS Nano*, 8(3), 2369–2376. <https://doi.org/10.1021/nn405827t>
- Kuzmichev, D. S., & Markeev, A. M. (2021). Neuromorphic properties of forming-free non-filamentary TiN/Ta₂O₅/Ta structures with an asymmetric current–voltage characteristic. *Nanobiotechnology Reports*, 16(6), 804–810. <https://doi.org/10.1134/S2635167621060136>
- Larentis, S., Nardi, F., Balatti, S., Gilmer, D. C., & Ielmini, D. (2012). Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM — Part II: Modeling. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 59(9), 2468–2475. <https://doi.org/10.1109/TED.2012.2202320>
- Mazady, A., & Anwar, M. (2014). Memristor: Part I — The underlying physics and conduction mechanism. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 61(4), 1054–1061. <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2304436>
- Noman, M., Jiang, W., Salvador, P. A., Skowronski, M., & Bain, J. A. (2011). Computational investigations into the operating window for memristive devices based on homogeneous ionic motion. *Applied Physics A*, 102(4), 877–883. <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6270-y>
- Pahinkar, D. G., Basnet, P., West, M. P., Zivasatienraj, B., Weidenbach, A., Doolittle, W. A., Vogel, E., & Graham, S. (2020). Experimental and computational analysis of thermal environment in the operation of HfO₂ memristors. *AIP Advances*, 10(3), Article 035127. <https://doi.org/10.1063/1.5141347>
- Parit, A. K., Yadav, M. S., Gupta, A. K., Mikhaylov, A., & Rawat, B. (2021). Design and modeling of niobium oxide-tantalum oxide based self-selective memristor for large-scale crossbar memory. *Chaos, Solitons & Fractals*, 145, Article 110818. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110818>

- Patil, P. J., Ahir, N. A., Yadav, S., Revadekar, C. C., Khot, K. V., Kamat, R. K., Dongale, T. D., & Kim, D. K. (2020). Effect of conductive filament temperature on ZrO₂ based resistive random access memory devices. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 12(2), Article 02008. [https://doi.org/10.21272/JNEP.12\(2\).02008](https://doi.org/10.21272/JNEP.12(2).02008)
- Pil'nik, A. A., Chernov, A. A., & Islamov, D. R. (2020). Charge transport mechanism in dielectrics: drift and diffusion of trapped charge carriers. *Scientific Reports*, 10(1), Article 15759. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72615-1>
- Sato, Y., Kinoshita, K., Aoki, M., & Sugiyama, Y. (2007). Consideration of switching mechanism of binary metal oxide resistive junctions using a thermal reaction model. *Applied Physics Letters*, 90(3), Article 033503. <https://doi.org/10.1063/1.2431792>
- Shen, W., Kumar, S., & Kumar, S. (2021). Experimentally calibrated electro-thermal modeling of temperature dynamics in memristors. *Applied Physics Letters*, 118(10), Article 103505. <https://doi.org/10.1063/5.0039797>

Информация об авторах

Александр Николаевич Бусыгин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; старший научный сотрудник, лаборатория мемристорных материалов, Центр природовдохновленного инжиниринга, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
a.n.busygin@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3439-8067>

Бауржан Хайрулович Габдулин, аспирант кафедры прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; младший научный сотрудник, лаборатория мемристорных материалов, Центр природовдохновленного инжиниринга, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
baurzhan.gabdulin@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2586-7469>

Сергей Юрьевич Удовиченко, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; научный руководитель лаборатории мемристорных материалов, Центр природовдохновленного инжиниринга, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
udotgu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3583-7081>

Никита Анатольевич Шулаев, аспирант кафедры прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; младший научный сотрудник, лаборатория мемристорных материалов, Центр природовдохновленного инжиниринга, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
a.a.shulaev@utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9673-0137>

Александр Дмитриевич Писарев, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; старший научный сотрудник, лаборатория мемристорных материалов, Центр природовдохновленного инжиниринга, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
spcb.doc@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5602-3880>

Абдулла Хайдар Абдо Ибрагим, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, лаборатория мемристормых материалов, Центр природовдохновленного инжиниринга, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
abdulla.ybragim@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1709-9882>

Information about the authors

Alexander N. Busygin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia; Senior Researcher, Memristive Materials Laboratory, Center for Nature-Inspired Engineering, University of Tyumen, Tyumen, Russia
a.n.busygin@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3439-8067>

Baurzhan H. Gabdulin, Postgraduate Student, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia; Junior Researcher, Memristive Materials Laboratory, Center for Nature-Inspired Engineering, University of Tyumen, Tyumen, Russia
baurzhan.gabdulin@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2586-7469>

Sergey Yu. Udovichenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia; Scientific Director of the Memristive Materials Laboratory, Center for Nature-Inspired Engineering, University of Tyumen, Tyumen, Russia
udotgu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3583-7081>

Nikita A. Shulaev, Postgraduate Student, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia; Junior Researcher, Memristive Materials Laboratory, Center for Nature-Inspired Engineering, University of Tyumen, Tyumen, Russia
a.a.shulaev@utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9673-0137>

Alexander D. Pisarev, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia; Senior Researcher, Memristive Materials Laboratory, Center for Nature-Inspired Engineering, University of Tyumen, Tyumen, Russia
spcb.doc@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5602-3880>

Abdulla H. A. Ebrahim, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Junior Researcher, Memristive Materials Laboratory, Center for Nature-Inspired Engineering, University of Tyumen, Tyumen, Russia
abdulla.ybragim@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1709-9882>