——— МЕМРИСТОРЫ ——

УДК 538.975, 621.3.01, 621.377.6

# ЭВОЛЮЦИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО МЕМРИСТОРА

© 2024 г. А. В. Фадеев\*, К. В. Руденко\*\*

Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук,

Москва, Россия \*E-mail: rudenko@ftian.ru; \*\*E-mail: AlexVFadeev@gmail.com Поступила в редакцию 08.04.2024 г. После доработки 25.04.2024 г. Принята к публикации 25.04.2024 г.

Предложена теоретическая модель, способная описать вольт-амперную характеристику для биполярного мемристора филаментарного типа при обратимых переключениях. Модель позволяет описать ВАХи разного вида, наблюдаемые в экспериментах. Установлено, что изначально сформованный филамент после ряда переключений приобретает стационарную форму, многократно воспроизводящую ВАХ при дальнейших переключениях.

Ключевые слова: мемристор, филамент

DOI: 10.31857/S0544126924040036

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одними из концептуально новых и наиболее привлекательными в последнее время выглядят устройства на основе различных резистивных состояний в диэлектриках [1-4]. Данные устройства обладают: хорошей масштабируемостью, небольшой мощностью переключения, большими временами хранения информации и числом циклов перезаписи, а также малым временем переключения [2]. Все это делает их перспективными устройствами памяти с возможностью построения интегральных схем. В общем случае в мемристорной ячейке наблюдаются резистивные переключения с множественными состояниями сопротивления [2, 5]. Настоящая работа рассматривает двухуровневые резистивные переключения (ReRAM). Данный тип мемристоров может быть использован при создании оперативной памяти.

Несмотря на очевидный прогресс, проблемы надежности (число переключений, время хранения информации) и воспроизводства ячеек ReRAM в настоящее время остаются недостатками указанной технологии. Влияние характеристик импульса переключения, а также свойств активной среды и проводящих электродов на эти параметры до конца не изучено, особенно когда объем активной среды ReRAM близок к пределам масштабируемости.

В настоящее время в литературе представлено множество численных и аналитических моделей описывающих переключение, мемристорной ячейки, например [6–14]. В некоторых из этих работ не учитывается транспорт электронов через потенциал контакта на границе раздела оксида с металлом [6, 7]. В других, зависимость тока от напряжения определяется модельными функциями с подгоночными коэффициентами [9, 10]. Во многих работах температура активной среды принимается однородной [11]. Соответствие экспериментальной и расчетной ВАХ, часто носит качественный характер [12]. Для более точного описания переключения и прогнозирования надежности необходимы новые модели, способные как можно более точно описать экспериментальную ВАХ переключения мемристорной ячейки.

#### 2. МОДЕЛЬ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Рассмотрим наиболее распространенную структуру мемристорной ячейки, работа которой основана на процессе разрыва/восстановления проводящего филамента. Такие виды мемристорных ячеек в настоящее время широко исследуются экспериментально [1–3]. Общая схема такой ячейки изображена на рис. 1. Ячейка состоит из двух химически неактивных проводящих электродов и оксидного слоя между ними. Оксидный слой содержит в себе область нестехиометрического оксида, выступающего в роле резервуара вакансий. Мы предполагаем, что проводящий филамент уже образован в оксидном слое в процессе формовки



**Рис. 1.** Общая схема мемристорной ячейки, принятая в модели.

и имеет осесимметричную (цилиндрическую) форму.

Согласно принятой модели [15] радиус ( $R_{el}$ ) и высота (H<sub>el</sub>) электрода предполагаются равными 100 нм и 25 нм соответственно, что находятся в согласии со множеством экспериментов [2]. Резервуар вакансий рассматривается в виде граничного условия с постоянной концентрацией  $(n_{res})$ . Толщина оксидного слоя/филамента ( $H_{\rm f}$ ), принятая в модели, составляет 5 нм. Граница, соответствующая r = 0, является осью аксиальной симметрии. Начальная концентрация вакансий кислорода в сформованном филаменте предполагается однородной и равной  $n_{\rm f} = n_{\rm res}$ , а в остальной части оксида  $n_{\rm ox} << n_{\rm res}$ . На границах между электродами и оксидным слоем учитываются постоянные потенциальные барьеры с энергиями  $\phi_t$  и  $\phi_b$ . Энергии миграции кислородных вакансий в филаменте и окружающем его оксиде предполагаются соответственно равными  $W_{\rm m f}$  и  $W_{\rm m ox}$ . В проводящих электродах диффузия кислородных вакансий считается невозможной. Нижний электрод заземлен. Электрический ток, проходящий через структуру, при приложении к верхнему электроду импульса напряжения, вызывает локальный нагрев областей филамента. Это экспоненциально увеличивает скорость диффузии и миграции кислородных вакансий, способствуя как разрыву филамента, так и его восстановлению.

Изначально сформованный филамент определяет состояние низкого сопротивления (LRS) мемристорной ячейки (рис. 1). Положительный потенциал, приложенный к верхнему электроду, инициирует резистивный нагрев различных областей. Величина нагрева определяется как силой тока, так и локальным сопротивлением филамента, которое зависит от локальной концентрации вакансий кислорода (*n*). Локальный нагрев усиливает дрейф в электрическом поле положительно заряженных кислородных вакансий. В результате происходит разрыв филамента, что переводит мемристорную ячейку в высокоомное состояние (HRS). Отрицательный потенциал, подаваемый на верхний электрод, способствует обратному движению кислородных вакансий, что приводит к восстановлению проводящего филамента и возвращению его в низкоомное состояние (LRS).

Поэтому, решение поставленной задачи требует самосогласованного рассмотрения уравнений теплопроводности, диффузии и дрейфа кислородных вакансий в электрическом поле, а также уравнения непрерывности, с равным нулю внутренним источником заряда.

Уравнения должны включать:

 падение напряжения на границах оксид/проводящий электрод, зависящее от локальных температуры и концентрации кислородных вакансий

• прохождение электрического тока через мемристорную ячейку, определяемую температурой и концентрацией вакансий кислорода

• локальный Джоулев нагрев, зависящий от локального сопротивления оксидного слоя

• диффузию и дрейф кислородных вакансий при наличии локальных температурных и электрических полей

В нашей предыдущей работе [15] была построена модель биполярного переключения мемристорной ячейки филаментарного типа. Согласно модели сила тока (I) в филаменте постоянна, а приложенное напряжение распределяется между контактами на границах оксид/электрод ( $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$ ) и филаментом ( $V_f$ ). Основное падение напряжения происходит на барьере, имеющем обратное смещение. Сила тока через него определяется суммой надбарьерной и туннельной составляющих

$$\begin{cases} V = V_{c1} + V_f + V_{c2} \\ V_f = I \int_{0}^{H_f} \frac{dz}{\sigma_f \pi r^2} \\ I = \int (J_{Sch}(V_{c1}, V_{c2}) + J_{FN}(V_{c1}, V_{c2})) dS \end{cases}$$
(1)

В (1)  $\sigma_f$  — проводимость филамента в точке (*z*, *r*), *r* — радиус филамента при данной координате *z*.

$$\sigma_f = A \frac{3e^2 \sqrt{2mW_i}}{\pi^2 \hbar^2} e^{-\frac{2\sqrt{2mW_i}}{\hbar} \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi n}}}, \qquad (2)$$

где n = n(z, r, T, t) — локальная концентрация кислородных вакансий в области филамента, A —параметр, определяемый из соответствия с экспериментальными результатами,  $\hbar$  — постоянная Планка, e — элементарный заряд, m — эффективная масса электрона,  $W_i$  — энергия электрона в кислородной вакансии.

 $J_{Sch}$  — плотность надбарьерного тока контакта, определяемая формулой Шоттки [16] и имеющая вид:

$$J_{Sch} = C_{RD} T^2 e^{\frac{\varphi}{kT}} \left[ 1 - e^{-\frac{ev_c}{kT}} \right], \tag{3}$$

где  $C_{RD}$  постоянная Ричардсона,  $\phi$  — высота потенциального барьера, T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана.

*J<sub>FN</sub>* — плотность туннельного тока контакта, определяемая формулой Фаулера-Нордгейма [16]

$$J_{FN} = \frac{e^{3} E_{c}^{2}}{16\pi^{2} \hbar \varphi} e^{-\frac{4\sqrt{2m\phi^{3}}}{3e\hbar E_{c}}},$$
(4)

где  $E_c$  — максимальная напряженность электрического поля барьера ( $E_c = 2V_c/H_f$ ).

При численном решении системы (1) учитывалось, что после формовки потенциальные барьеры на границах филамента понижаются [17]. Для решения системы (1) подбираются значения падения напряжения на барьерах ( $V_{c1}$  и  $V_{c2}$ ) так, чтобы удовлетворить постоянству силы тока через мемристорную ячейку.

Поскольку резистивная электропроводность филамента значительно превышает проводимость окружающего оксида, то источник Джоулева тепла будет сосредоточен в области филамента. Теплопроводность металлических электродов значительно превосходит теплопроводность активного слоя мемристорной ячейки. А радиальные размеры ячейки много больше радиуса филамента. В результате, температура поверхности мемристорной ячейки была выбрана постоянной и равной температуре окружающей среды ( $T_e$ ). Расчеты показали, что тепловым потоком, связанным с дрейфом кислородных вакансий, можно пренебречь. В результате уравнение теплопроводности для мемристорной ячейки можно записать в виде:

$$\begin{cases} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\chi \nabla T) + Q \\ Q = \vec{J} \vec{E} \end{cases}, \tag{5}$$

где  $\chi$  — коэффициент теплопроводности, C — теплоемкость,  $\rho$  — плотность, Q — источник тепла, вызванный Джоулевым нагревом филамента.

Кинетическое уравнение, описывающее диффузию и дрейф кислородных вакансий во внешнем электрическом поле (E) [18] может быть записано в виде:

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 53 № 4 2024

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \left( -D\nabla n + \frac{zeED}{kT}n \right) = 0, \tag{6}$$

где n — концентрация кислородных вакансий, D — коэффициент их диффузии, z — заряд кислородной вакансии, e — элементарный заряд, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

На границе оксид/нижний электрод предполагается наличие слоя — резервуара вакансий, поэтому концентрация на этой границе принята постоянной и равной  $n_{\rm res}$ , поток кислородных вакансий через границу оксида с верхним электродом предполагается равным нулю. Начальная концентрация вакансий в сформованном филаменте предполагается равной  $n_{\rm f} = n_{\rm res}$ , а в остальной части оксида  $n_{\rm ox} = 0.001 n_{\rm res}$ .

В результате, самосогласованное решение уравнений (1-5) позволят описать переключение мемристорной ячейки под действием импульса внешнего напряжения, приложенного к верхнему электроду. Решение указанных уравнений дало возможность промоделировать ВАХ рассматриваемого прибора, и выявить момент переключения состояний LRS – HRS и обратно. Сравнение расчетной вольт-амперной характеристики с экспериментальной [15] позволило определить параметры задачи, такие как высоты энергетических барьеров на границах активного слоя и электродов, энергию миграции кислородных вакансий, теплопроводность филамента и др. Полученные значения согласуются с экспериментальными данными представленными в литературе.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Моделирование проводилось для условий, когда ток в состоянии LRS ограничивается внешним источником, что соответствует реальному эксперименту по снятию ВАХ мемристоров. В результате расчетов по предлагаемой модели была построена вольт-амперная характеристика, изображенная на рис. 2 (кривая *I*), находящаяся в хорошем согласии с экспериментальной работой [19]. Модель описывает особенность (А) на кривой ВАХ во время операции RESET, имеющую участок отрицательного дифференциального сопротивления (область 0.6–1.4 В на рис. 2). Аналогичная особенность также наблюдалась в работах [20–24].

Причиной появления особенности является нелинейная зависимость проводимости от концентрации кислородных вакансий. Когда концентрация высока (~ $10^{21}$  см<sup>-3</sup>), ее изменение меняет проводимость на проценты. При низкой концентрации (~ $10^{20}$  см<sup>-3</sup>), ее уменьшение приводит к уменьшению проводимости филамента на порядок.



**Рис. 2.** Расчетные вольт-амперные характеристики, соответствующие различным радиусам изначально сформованного филамента.



**Рис. 3.** Расчетные вольт-амперные характеристики, соответствующие различным граничным напряжениям операции RESET.

На рис. 2 (кривая 2) также приведена расчетная кривая ВАХ без особенности. Такой вид ВАХ наблюдался в работах [24, 25]. Указанная зависимость была получена при изменении единственного параметра — радиуса цилиндрического филамента равного  $R_{\rm fil} = 5.8$  нм (вместо  $R_{\rm fil} = 5$  нм). Увеличение радиуса филамента приводит к росту его проводимости, и, следовательно, к уменьшению температуры. В результате особенность сдвигается в область более высоких напряжений, которые превышают граничное напряжение рассматриваемой ВАХ и поэтому не наблюдается экспериментально.

На рис. 3 приведены ВАХ с различными граничными напряжениями операции RESET. Похожие вольт-амперные характеристики можно наблюдать в работах [23, 24]. Отношения сопротивлений

 $R_{\rm HRS}/R_{\rm LRS}$  при напряжении чтения (0.1 V) для приведенных кривых соответственно равны: 22 ( $V_{\rm rp}$ = 1.4 V), 13 ( $V_{\rm rp}$ = 1 V), 8 ( $V_{\rm rp}$ = 0.8 V) и 1.8 ( $V_{\rm rp}$ = 0.6 V) (см. вставка на рис. 3). Когда граничное напряжение лежит внутри особенности А, левая часть ВАХ (отрицательные напряжения) уменьшается пропорционально граничному напряжению (рис. 3). Если граничное напряжение меньше напряжения, отвечающего началу особенности А, то вид ВАХ меняется. Для приведенных вольт-амперных характеристик можно оптимизировать граничное напряжение для получения необходимых значений отношения сопротивлений  $R_{\rm HRS}/R_{\rm LRS}$ и потребляемой ячейкой мощности. Уменьшение граничного напряжения уменьшает потребляемую мемристорной ячейкой мощность, но приводит к сужению окна переключения. Напряжение  $V_{\rm rp} = 0.5$  В является критическим, ниже которого переключения для рассматриваемой структуры не происходит.

Была исследована эволюции ВАХ для нескольких циклов переключения. На рис. 4 изображены четыре цикла переключения изначально сформованного цилиндрического филамента. Основное отличие кривых ВАХ находится в области операции RESET и обусловлено изменением формы филамента, которое способствует росту его проводимости. Эволюция сопротивлений  $R_{\rm HRS}$  и  $R_{\rm LRS}$ при напряжении чтения (0.1 V) как функция числа циклов переключения представлена на вставке рис. 4. Расчеты показали, что ВАХи, соответствующие пятому и шестому циклам переключения, практически полностью воспроизводят соответствующие кривые для третьего и четвертого циклов соответственно.

Рассмотрим более подробно вольт-амперные характеристики, соответствующие третьему и четвертому циклам переключения. Более



Рис. 4. Расчетные вольт-амперные характеристики, соответствующие четырем циклам переключения.

раннее переключение LRS  $\rightarrow$  HRS на третьем цикле (по сравнению с четвертым) приводит к понижению сопротивления в высокоомном состоянии ( $R_{HRS}$ ). Это вызывает ранний нагрев при обратном переключении, которое происходит при более низком напряжении ( $V_{\pi}^{SET}$ ). Смена полярности осуществляется при фиксированном напряжении ( $V_{rp}^{SET} = -0.8$  B). Уменьшение напряжения в диапазоне от  $V_{\pi}^{SET}$  до  $V_{rp}^{SET}$  приводит к утолщению филамента, увеличивая его проводимость. Рост диаметра филамента способствует более позднему переключению LRS  $\rightarrow$  HRS на следующем цикле (рис. 2). При этом  $R_{HRS}$  растет, вызывая увеличение  $V_{\pi}^{SET}$ . Как следствие, сужается область напряжений (от  $V_{\pi}^{SET}$  до  $V_{rp}^{SET}$ ) увеличивающая толщину филамента и его диаметр становится меньше, по сравнению с предыдущим циклом переключения. При дальнейших переключениях результат повторяется.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью самосогласованной аналитической модели построена вольт-амперная характеристика биполярного мемристора филаментарного типа во всем диапазоне переключений LRS — HRS — LRS. Модель включает в себя уравнения теплопроводности, диффузии и дрейфа кислородных вакансий в электрическом поле, а также уравнения непрерывности, с равным нулю внутренним источником заряда.

Показано, что модель позволяет описать вольт-амперные характеристики как имеющие особенность, так и не имеющие ее.

Получено, что изначально сформованный филамент после ряда переключений приобретает форму, многократно воспроизводящую ВАХ при дальнейших переключениях.

Исследование выполнено в рамках госзадания FFNN-2022-0019 для ФТИАН им. К.А. Валиева РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Soni K. and Sahoo S. A Review On Different Memristor Modeling And Applications // 2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (ME-CON), Noida, India, 2022. P. 688–695.
- 2. Xiao Y., Jiang B., Zhang Z., Ke Sh., Jin Y., Wen X. A review of memristor: material and structure design, device performance, applications and prospects // Sci. and Tec. of adv. Mat. 2023. V. 24. № 1. P. 1–24.
- Patil A.R., Dongale T.D., Kamat R.K., Rajpure K.Y. Binary metal oxide-based resistive switching memory devices: a status review // Materials today communications 2023. V. 34. P. 105356.

- 4. *Fadeev A.V., Rudenko K.V.* To the Issue of the Memristor's HRS and LRS States Degradation and Data Retention Time // *Russ. Microelectron.* 2022. V. 50. № 5. P. 311–325.
- Wu L., Liu H., Li J., Wang S., Wang X. A Multi-level Memristor Based on Al-Doped HfO<sub>2</sub> Thin Film. // Nanoscale Res. Lett. 2019. V. 14. P. 177.
- Larentis S., Nardi F., Balatti S., Gilmer D.C. and Ielmini D. Resistive Switching by Voltage-Driven Ion Migration in Bipolar RRAM-Part II: Modeling. // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. V. 59. P. 2468–2475.
- Tang Z., Fang L., Xu N., Liu R. Forming compliance dominated memristive switching through interfacial reaction in Ti/TiO<sub>2</sub>/Au structure. // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 185309.
- Villena M.A., González M.B., Roldán J.B., Campabadal F., Jiménez-Molinos F., Gómez-Campos F.M., Suñé J. An in-depth study of thermal effects in reset transitions in HfO2 based RRAMs. // Solid-State Electronics. 2015. V. 111. P. 47–51.
- Rziga F.O., Mbarek K., Ghedira S., Besbes K. An efficient Verilog-A memristor model implementation: simulation and application. // J. Comput. Electron. 2019. V. 18. P. 1055–1064.
- Ji X., Dong Z., Lai C.S., Zhou G., Qi D. A physics-oriented memristor model with the coexistence of NDR effect and RS memory behavior for bio-inspired computing. // Materials Today Advances, 2022. V. 16. P. 100293.
- Marchewka A., Waser R. and Menzel S. Physical simulation of dynamic resistive switching in metal oxides using a Schottky contact barrier model. // 2015 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), Washington DC. USA. 2015. P. 297–300.
- Maruf M.H. &. Ali S.I. Review and comparative study of I–V characteristics of different memristor models with sinusoidal input. // International Journal of Electronics, 2020. V. 107:3. P. 349–375.
- Guo T., Pan K., Jiao Y., Sun B., Du C., Mills J.P., Chen Z., Zhao X., Wei L., Zhou Y.N., Wu Y.A. Versatile Memristor for Memory and Neuromorphic Computing. // Nanoscale Horiz. 2022. V. 7. № 3. P. 299–310.
- Shen W., Kumar S., Kumar S. Experimentally calibrated electro-thermal modeling of temperature dynamics in memristors. // Appl. Phys. Lett. 2021. V. 118. P. 103505.
- Fadeev A.V., Rudenko K.V. Filament-based memristor switching model. // Microelectron. Eng. 2024. V. 289. P. 112179.
- 16. *Sze S.M., Ng K.K.* Physics of Semiconductor Devices. // Third ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
- 17. Marchewka A., Waser R. and Menzel S. A 2D axisymmetric dynamic drift-diffusion model for numerical simulation of resistive switching phenomena in metal oxides. // 2016 International Conference On

Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). Nuremberg. Germany. 2016. P. 145–148.

- Manning J.R. Diffusion kinetics for atoms in crystals. // D. Van nostrand company. inc. princeton 1968.
- Permiakova O.O., Rogozhin A.E., Miakonkikh A.V., Smirnova E.A., Rudenko K.V. Transition between resistive switching modes in asymmetric HfO<sub>2</sub>-based structures. // Microelectron. Eng. 2023. V. 275. 111983.
- Mahata C., Kang M., Kim S. Multi-Level Analog Resistive Switching Characteristics in Tri-Layer HfO<sub>2</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HfO<sub>2</sub> Based Memristor on ITO Electrode Nanomaterials. 2020. V. 10. P. 2069.
- Tang L., Maruyama H., Han T., Nino J.C., Chen Y., Zhang D. Resistive switching in atomic layer deposited HfO2/ZrO<sub>2</sub> nanolayer stacks. // App. Surf. Sci. 2020. V. 515. P. 146015.

- 22. *Hao Y.X., Zhang Y., Wu Z.H., Zhang X.M., Shi T., Wang Y.Z., Zhu J.X., Wang R., Wang Y., Liu Q.* Uniform, fast, and reliable CMOS compatible resistive switching memory. // J. Semicond. 2022. V. 43. № 5. P. 054102.
- Jiang H., Han L., Lin P., Wang Z., Jang M.H., Wu Q., Barnell M., Yang J.J., Xin H.L., Xia Q. Sub-10 nm Ta Channel Responsible for Superior Performance of a HfO<sub>2</sub> Memristor. // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 28525.
- Otsus M., Merisalu J.; Tarre A., Peikolainen A.-L., Kozlova J., Kukli K., Tamm A.A. Bipolar Resistive Switching in Hafnium Oxide-Based Nanostructures with and without Nickel Nanoparticles. // 2022. V. 11. P. 2963.
- 25. Ismail M., Mahata C., Kang M., Kim S, Robust Resistive Switching Constancy and Quantum Conductance in High-k Dielectric-Based Memristor for Neuromorphic Engineering. // Nanoscale Res. Lett. 2022. V. 17. P. 61.

# **Evolution of the Current-Voltage Characteristic of a Bipolar Memristor**

# © 2024 A. V. Fadeev\*, K. V. Rudenko\*\*

Valiev Institute of Physics and Technology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia \*E-mail: AlexVFadeev@gmail.com; \*\*E-mail: rudenko@ftian.ru

A theoretical model is proposed that can describe the current-voltage characteristic of a bipolar filament memristor during reversible switching. The model allows us to describe various types of current-voltage curves observed in experiments. It has been established that the initially formed filament, after a series of switching, acquires a stationary shape that reproduces the current-voltage characteristic.

Keywords: memristor, filament

## REFERENCES

- Soni K. and Sahoo S. A Review On Different Memristor Modeling And Applications // 2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON), Noida, India, 2022. P. 688–695.
- Xiao Y., Jiang B., Zhang Z., Ke Sh., Jin Y., Wen X. A review of memristor: material and structure design, device performance, applications and prospects // Sci. and Tec. of adv. Ma t. 2023. V. 24. № 1. P. 1–24.
- Patil A.R., Dongale T.D., Kamat R.K., Rajpure K.Y. Binary metal oxide-based resistive switching memory devices: a status review // Materials today communications 2023. V. 34. P. 105356.
- Fadeev A.V., Rudenko K.V. To the Issue of the Memristor's HRS and LRS States Degradation and Data Retention Time // Russ. Microelectron. 2022. V. 50. № 5. P. 311–325.

- Wu L., Liu H., Li J., Wang S., Wang X. A Multi-level Memristor Based on Al-Doped HfO<sub>2</sub> Thin Film. // Nanoscale Res. Lett. 2019. V. 14. P. 177.
- Larentis S., Nardi F., Balatti S., Gilmer D.C. and Ielmini D. Resistive Switching by Voltage-Driven Ion Migration in Bipolar RRAM-Part II: Modeling. // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. V. 59. P. 2468–2475.
- Tang Z., Fang L., Xu N., Liu R. Forming compliance dominated memristive switching through interfacial reaction in Ti/TiO<sub>2</sub>/Au structure. // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 185309.
- Villena M.A., González M.B., Roldán J.B., Campabadal F., Jiménez-Molinos F., Gómez-Campos F.M., Suñé J. An in-depth study of thermal effects in reset transitions in HfO2 based RRAMs. // Solid-State Electronics. 2015. V. 111. P. 47–51.
- 9. *Rziga F.O., Mbarek K., Ghedira S., Besbes K.* An efficient Verilog-A memristor model implementation:

simulation and application. // J. Comput. Electron. 2019. V. 18. P. 1055–1064.

- Ji X., Dong Z., Lai C.S., Zhou G., Qi D. A physics-oriented memristor model with the coexistence of NDR effect and RS memory behavior for bio-inspired computing. // Materials Today Advances, 2022. V. 16. P. 100293.
- Marchewka A., Waser R. and Menzel S. Physical simulation of dynamic resistive switching in metal oxides using a Schottky contact barrier model. // 2015 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), Washington DC. USA. 2015. P. 297–300.
- Maruf M.H. &. Ali S.I. Review and comparative study of I–V characteristics of different memristor models with sinusoidal input. // International Journal of Electronics, 2020. V. 107:3. P. 349–375.
- Guo T., Pan K., Jiao Y., Sun B., Du C., Mills J.P., Chen Z., Zhao X., Wei L., Zhou Y.N., Wu Y.A. Versatile Memristor for Memory and Neuromorphic Computing. // Nanoscale Horiz. 2022. V. 7. № 3. P. 299–310.
- Shen W., Kumar S., Kumar S. Experimentally calibrated electro-thermal modeling of temperature dynamics in memristors. // Appl. Phys. Lett. 2021. V. 118. P. 103505.
- Fadeev A.V., Rudenko K.V. Filament-based memristor switching model. // Microelectron. Eng. 2024. V. 289. P. 112179.
- Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. // Third ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
- 17. Marchewka A., Waser R. and Menzel S. A 2D axisymmetric dynamic drift-diffusion model for numerical simulation of resistive switching phenomena in metal oxides. // 2016 International Conference On

Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). Nuremberg. Germany. 2016. P. 145–148.

- Manning J.R. Diffusion kinetics for atoms in crystals. // D. Van nostrand company. inc. princeton 1968.
- Permiakova O.O., Rogozhin A.E., Miakonkikh A.V., Smirnova E.A., Rudenko K.V. Transition between resistive switching modes in asymmetric HfO<sub>2</sub>-based structures. // Microelectron. Eng. 2023. V. 275. 111983.
- Mahata C., Kang M., Kim S. Multi-Level Analog Resistive Switching Characteristics in Tri-Layer HfO<sub>2</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HfO<sub>2</sub> Based Memristor on ITO Electrode Nanomaterials. 2020. V. 10. P. 2069.
- Tang L., Maruyama H., Han T., Nino J.C., Chen Y., Zhang D. Resistive switching in atomic layer deposited HfO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> nanolayer stacks. // App. Surf. Sci. 2020. V. 515. P. 146015.
- 22. Hao Y.X., Zhang Y., Wu Z.H., Zhang X.M., Shi T., Wang Y.Z., Zhu J.X., Wang R., Wang Y., Liu Q. Uniform, fast, and reliable CMOS compatible resistive switching memory. // J. Semicond. 2022. V. 43. № 5. P. 054102.
- Jiang H., Han L., Lin P., Wang Z., Jang M.H., Wu Q., Barnell M., Yang J.J., Xin H.L., Xia Q. Sub-10 nm Ta Channel Responsible for Superior Performance of a HfO<sub>2</sub> Memristor. // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 28525.
- Otsus M., Merisalu J.; Tarre A., Peikolainen A.-L., Kozlova J., Kukli K., Tamm A.A. Bipolar Resistive Switching in Hafnium Oxide-Based Nanostructures with and without Nickel Nanoparticles. // 2022. V. 11. P. 2963.
- 25. Ismail M., Mahata C., Kang M., Kim S, Robust Resistive Switching Constancy and Quantum Conductance in High-k Dielectric-Based Memristor for Neuromorphic Engineering. // Nanoscale Res. Lett. 2022. V. 17. P. 61.