

Компактная многофиламентная модель резистивного переключения металлооксидного мемристора

Абдулла Хайдар Абдо Ибрагим, Алексей Александрович Губин,
Александр Николаевич Бусыгин [✉], Сергей Юрьевич Удовиченко

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

Аннотация. Представлена достаточно простая компактная схмотехническая многофиламентная модель резистивного переключения металлооксидного мемристора с контролируемой многоуровневой настройкой проводимости, которая востребована для самообучения больших массивов мемристорных синапсов и обработки информации с их помощью. Показано хорошее согласие между расчетными и измеренными вольт-амперной характеристикой и кривой пластичности, зависимой от времени импульса.

Ключевые слова: компактная схмотехническая модель, многофиламентное состояние, мемристор, вольт-амперная характеристика, пластичность мемристора

Благодарности: исследование проведено при поддержке Программы развития университетов Российской Федерации «Приоритет 2030» в Центре природо-
дохновенного инжиниринга.


Цитирование: Ибрагим А. Х. А., Губин А. А., Бусыгин А. Н., Удовиченко С. Ю. 2023. Компактная многофиламентная модель резистивного переключения металлооксидного мемристора // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 9. № 2 (34). С. 128–138. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-2-128-138>

Поступила 13.06.2023; одобрена 14.06.2023; принята 30.06.2023

Compact multifilament model of resistive switching metal-oxide memristor

Abdulla H. A. Ebrahim, Alexey A. Gubin, Alexander N. Busygin ,
Sergey Yu. Udovichenko

University of Tyumen, Tyumen, Russia

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

Abstract. A fairly simple compact circuit multifilament resistive switching model of a metal-oxide memristor with controlled multilevel conductance tuning is presented, which is in demand for self-training of large arrays of memristor synapses and information processing using them. A good agreement between the calculated and measured volt-ampere characteristics and the pulse-time dependent plasticity curve is shown.

Keywords: compact circuit model, multifilament state, memristor, volt-ampere characteristic, memristor plasticity

Acknowledgements: the research was conducted with the support of the Russian Federation University Development Program “Priority 2030” at the Center for Nature-Inspired Engineering.

Citation: Ebrahim, A. H. A., Gubin, A. A., Busygin, A. N., & Udovichenko, S. Yu. (2023). Compact multifilament model of resistive switching metal-oxide memristor. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 9(2), 128–138. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-2-128-138>

Received June 13, 2023; Reviewed June 14, 2023; Accepted June 30, 2023

Введение

Известные однофиламентные [Busygin и др., 2023] и многофиламентные [Miranda и др., 2013; Asarc, Maiti, 2017; Chee и др., 2018] физические модели переключения металлооксидных мемристоров из низкопроводящего в высокопроводящее состояние учитывают протекающие в оксидном слое физические процессы, которые описываются системой нестационарных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных. Такие модели требуют большого времени расчетов и не могут применяться при моделировании работы мемристорных массивов большого размера.

Достаточно сложная компактная схемотехническая модель [González-Cordero и др., 2016] позволяет рассчитывать несколько филаментов. Однако в самой работе не проведено моделирование многофиламентного режима мемристора и нет сравнения с экспериментом. В работе [Zhuo и др., 2022] представлена более сложная компактная многофиламентная модель резистивного переключения мемристора, построенная на основе

эквивалентной электрической схемы. В этой модели для описания каждого филамента используется два параметра состояния. При этом экспериментальная и модельная вольт-амперные характеристики показывают достаточно хорошее совпадение, в том числе и в области скачков проводимости при резистивном переключении.

Целью настоящей работы является создание достаточно простой компактной схемотехнической многофиламентной модели резистивного переключения биполярного мемристора с контролируемой многоуровневой настройкой проводимости, в которой для описания всех филаментов используется один параметр состояния и которая востребована для симуляции больших мемристорных массивов.

Методы

Эквивалентная схема и уравнения модели

Разработана достаточно простая поведенческая компактная (схемотехническая) модель мемристора, которая согласуется с качественной моделью композитного мемристора с нитевидными областями проводимости (филаментами) [Martyshov и др., 2020]. Такой мемристор обладает контролируемыми резистивными состояниями [Nikiroy и др., 2018], одними из лучших электрическими характеристиками [Matsukatova и др., 2022], и его проводимость изменяется согласно биоподобной пластичности, зависящей от времени спайка (spike-timing-dependent plasticity, STDP) [Nikiroy и др., 2019]. Это позволяет считать его перспективным компонентом электроники для применения в нейроморфных вычислительных системах.

Сопrotивление мемристора изменяется в зависимости от того, какое количество филаментов замыкает его контакты, и от проводимости каждого филамента. Замыкания филаментов происходят хаотично, и их порядок во времени не повторяется одинаково в процессах перепрограммирования мемристора. Модель мемристора построена с помощью только схемотехнических решений.

В данной модели число замкнутых филаментов связано с величиной заряда, протекающего через мемристор. Основу динамической части электрической схемы модели мемристора составляет конденсатор, напряжение на обкладках которого пропорционально этому заряду. Этот конденсатор является запоминающей частью модели мемристора, как и во многих известных решениях. Настоящая модель позволяет эмулировать отдельные замыкания филаментов, в отличие от схемотехнического конденсаторно-транзисторного эмулятора мемристора, описанного в [Zhuo и др., 2022], где общее изменение сопротивления мемристора определяется работой конденсаторного интегратора и полевым транзистором в линейном режиме работы.

На рис. 1 представлена эквивалентная электрическая схема модели композитного мемристора, в которой резисторы R_f представляют собой филаменты, понижающие общее сопротивление мемристора при открытии соответствующих ключей. Ключи открываются при заданных напряжениях на конденсаторе C . Изменение напряжения на конденсаторе C между срабатыванием ключей определяет изменение размера филамента в слепой зоне его роста.

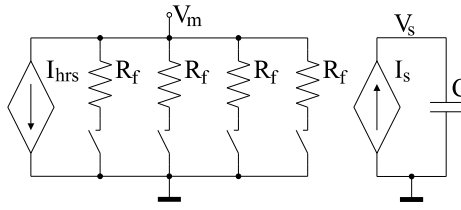


Рис. 1. Электрическая схема композитного мемристора

Fig. 1. Electrical scheme of the composite memristor

Суммарный ток через мемристор задается источником тока I_m и определяется формулой:

$$I_m = a \sinh(bV_m) + \sum_{i=1}^N \frac{V_m}{R_f} \theta(V_s - V_i), \quad (1)$$

где параметр a и b — подгоночные параметры; V_m — напряжение на мемристоре; N — количество филаментов; V_s — напряжение на конденсаторе C ; V_i — пороговые напряжения филаментов.

Скорость изменения единственного для всех филаментов параметра состояния V_s равна

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{I_s}{C}. \quad (2)$$

$$\text{Здесь } I_s = k_u V_m \theta(V_m - V_t) \theta(V_{s\max} - V_s) + k_d V_m \theta(-V_m - V_t) \theta(V_s - V_{s\min}), \quad (3)$$

где k_u — множитель скорости увеличения параметра состояния; k_d — множитель скорости уменьшения параметра состояния; V_t — пороговое напряжение на мемристоре для изменения параметра состояния; $V_{s\min}$ и $V_{s\max}$ — ограничение для параметра состояния снизу и сверху.

Как следует из формулы тока (3), изменение состояния мемристора происходит при соблюдении двух условий:

- 1) напряжение на мемристоре превышает порог V_t ;
- 2) параметр состояния не равен минимальному или максимальному значениям ($V_{s\min}$ и $V_{s\max}$).

Скорость изменения параметра состояния линейно зависит от приложенного к мемристорю напряжения. Минимально возможное значение параметра состояния $V_{s\min} = 0$, а максимально возможное — $V_{s\max} = 1$.

Во избежание проблем со сходимостью решения при моделировании в SPICE-симуляторе, функция Хевисайда была заменена на сплавленную версию с использованием известного соотношения:

$$\theta(x) \approx \frac{1}{1 + \exp(-2kx)}.$$

В отличие от функции Хевисайда, эта функция не имеет разрывов и дифференцируема на всей области определения.

Настройка модели и алгоритм моделирования

Настройка модели производится на основе экспериментально полученной вольт-амперной характеристики мемристора. Поскольку существуют участки вольт-амперной характеристики, где параметр состояния достигает своих предельных значений, целесообразно разбить процесс настройки на несколько этапов: низкопроводящее состояние, высокопроводящее состояние и процесс изменения состояния мемристора.

Оценка соответствия модельной и экспериментальной вольт-амперной характеристики проводилась по величине суммы квадратичных отклонений тока при разных напряжениях с шагом 0,01 В.

Проводимость закрытого мемристора задается параметрами a и b , а полностью открытого — параметром R_j . Поэтому сначала были найдены a и b , а затем R_j в предположении, что все филаменты находятся в проводящем состоянии.

Настройка процесса изменения состояния мемристора заключается в поиске параметров k_u и k_d , определяющих скорость изменения параметра состояния, а также пороговых напряжений перколяций филаментов.

Модель, содержащая четыре филамента, была настроена на экспериментальную вольт-амперную характеристику композитного мемристора [Nikiryu и др., 2019].

Алгоритм моделирования для настроенной многофиламентной модели резистивного переключения биполярного мемристора представлен ниже.

Алгоритм 1. Скрипт для расчета мемристора в LTspice. Plus и minus — терминалы мемристора, state-терминал — контроль состояния.

```

1  *Multifilamentary bipolar memristor model
2  .subckt memristor_4f plus minus state params:
3  + a=1e-4 b=1.76 Rf=163.0
4  + Vt=1.5 Vf1=0.4 Vf2=0.5 Vf3=0.9 Vf4=0.95
5  + Id=2 Ic=4 Cs=1 Vsmin=0.0 Vsmax=1.0
6  Ghrs plus minus value={a*sinh(b*V(plus,minus))+
7  + V(plus,minus)*hs(V(state)-Vf1,k)/Rf+
8  + V(plus,minus)*hs(V(state)-Vf2,k)/Rf+
9  + V(plus,minus)*hs(V(state)-Vf3,k)/Rf+
10 + V(plus,minus)*hs(V(state)-Vf4,k)/Rf}
11 Gstate 0 state value={Ic*V(plus,minus)*hs((V(plus,minus)-Vt),k)*hs((Vsmax-V(state)),k)+
12 +Id*V(plus,minus)*hs((-Vt-V(plus,minus)),k)*hs((V(state)-Vsmin),k)}
13 Cstate state 0 {Cs} ic=0
14 .param k=1000
15 .func hs(x,k)={1/(1+exp(-2*k*x))}
16 .ends memristor_4f

```

Результаты и обсуждение

Чтобы проверить корректность настроенной компактной многофиламентной модели биполярного мемристора, результаты численного моделирования были сравнены с экспериментальными данными.

На рис. 2 показано сравнение экспериментальной вольт-амперной характеристики [Nikiryu и др., 2019] с модельными при наличии одного и четырех филаментов.

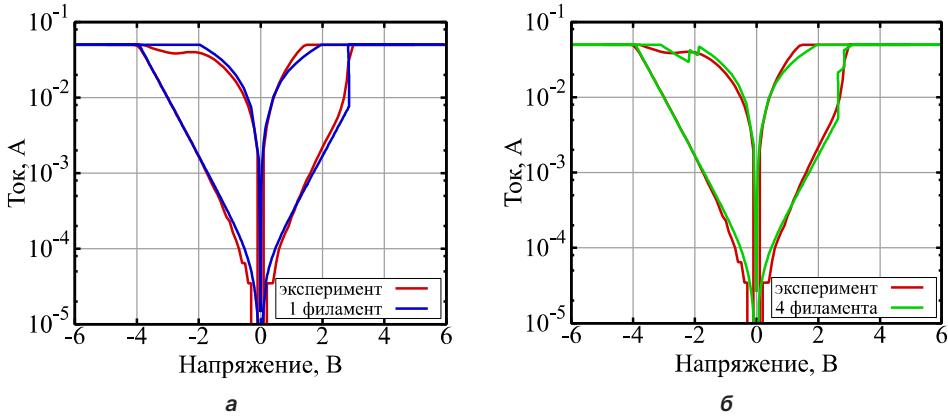


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики моделей с одним (а) и четырьмя (б) филаментами

Fig. 2. Volt-ampere characteristics of models with filament one (a) and four (б) filaments

Как следует из рис. 2, большее число филаментов позволяет точнее воспроизводить экспериментальную вольт-амперную характеристику в области резистивного переключения. В отличие от модели с четырьмя филаментами, однофиламентная модель хуже описывает процесс резистивного переключения при переходе в низкопроводящее состояние.

Наличие четырех филаментов с разным напряжением перколяции приводит к возможности реализации в модели пяти устойчивых состояний сопротивления (рис. 3).

В отличие от известных многофиламентных моделей, а тем более однофиламентных, предлагаемая многофиламентная модель позволяет напрямую задавать требуемые резистивные состояния как сопротивления отдельных филаментов и условия их возникновения. Каждое резистивное состояние будет определяться общим сопротивлением образовавшихся филаментов. Такой подход исключает процедуру пересчета параметров при настройке модели для реализации требуемых резистивных состояний.

На рис. 4 показаны кривые синаптической пластичности для правила STDP, экспериментальные из [Nikiryu и др., 2019] и рассчитанные с помощью предлагаемой модели мемристора при наличии одного и четырех филаментов.

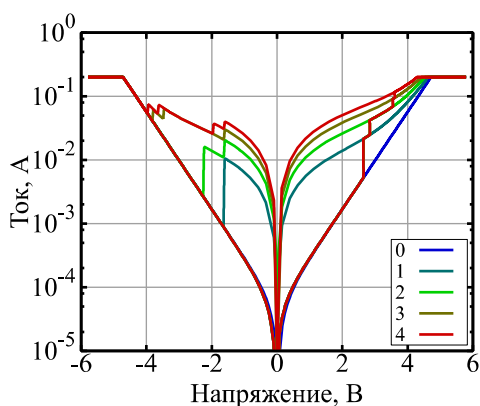


Рис. 3. Модельная вольт-амперная характеристика в зависимости от числа открытых филаментов в полулогарифмическом масштабе

Fig. 3. Model volt-ampere characteristic depending on the number of open filaments on a semi-logarithmic scale

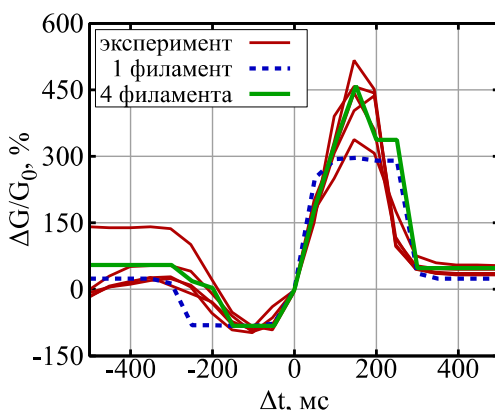


Рис. 4. Модельные и экспериментальные кривые пластичности STDP

Fig. 4. Model and experimental STDP plasticity curves

Несколько экспериментальных кривых [Nikigyu и др., 2019] соответствуют разным тестируемым мемристорам. Отличие модельных кривых от экспериментальных вызвано отсутствием прямых экспериментальных данных о скорости резистивного переключения. Скорость резистивного переключения в модели была подобрана в результате подгонки модельной вольт-амперной кривой к экспериментальной. Тем не менее видно, что четырехфиламентная модель лучше воспроизводит кривую пластичности, чем однофиламентная. В однофиламентной модели уменьшение проводимости при положительной Δt не происходит из-за недостаточной длительности воздействия надпорогового импульса напряжения. Удовлетворительное совпадение модельной и экспериментальных [Nikigyu и др., 2019] кривых пластичности показывает корректность разработанной модели мемристора.

Заключение

Представлена достаточно простая компактная схмотехническая многофиламентная модель резистивного переключения биполярного мемристора с контролируемой многоуровневой настройкой проводимости в металлооксидном мемристоре.

Предлагаемая модель содержит единственный параметр состояния для всех филаментов и отличается более простыми уравнениями для электрического тока и параметра состояния, а также лучшим согласием с экспериментальной вольт-амперной кривой, чем известные компактные модели с многофиламентным резистивным переключением.

Большее число филаментов позволяет точнее воспроизводить экспериментальную вольт-амперную характеристику мемристора со скачками проводимости и кривую пластичности STDP в области резистивного переключения. Скачки проводимости обусловлены образованием и разрушением отдельных филаментов в мемристоре.

В отличие от известных многофиламентных моделей, а тем более однофиламентных, предлагаемая многофиламентная модель позволяет напрямую задавать требуемые резистивные состояния как сопротивления отдельных филаментов и условия их возникновения.

Упрощенное дискретное описание процесса резистивного переключения позволяет моделировать большие мемристорские массивы без значительных вычислительных мощностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Asapu S., Maiti T. 2017. Multifilamentary conduction modeling in transition metal oxide-based RRAM // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 64. No. 8. Pp. 3145–3150. <https://doi.org/10.1109/TED.2017.2709249>
- Busygin A., Udovichenko S., Ebrahim A., Bobylev A., Gubin 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>
- Chee H. L., Nandha K. T., Almurib H. A. 2018. Multifilamentary conduction modelling of bipolar Ta₂O₅/TaO_x bi-layered RRAM // IEEE 7th Non-Volatile Memory Systems and Applications Symposium (NVMSA). Pp. 113–114. <https://doi.org/10.1109/NVMSA.2018.00029>
- González-Cordero A., Roldan J. B., Jiménez-Molinos F., Suñé J., Long S., Liu M. 2016. A new compact model for bipolar RRAMs based on truncated-cone conductive filaments — A Verilog-A approach // Semiconductor Science and Technology. Vol. 31. No. 11. Article 115013. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/11/115013>
- Martyshov M. N., Emelyanov A. V., Demin V. A., Nikiruy K. E., Minnekhanov A. A., Nikolaev S. N., Taldenkov A. N., Ovcharov A. V., Presnyakov M. Yu., Sitnikov A. V., Vasiliev A. L., Forsh P. A., Granovsky A. B., Kashkarov P. K., Kovalchuk M. V., Rylkov V. V. 2020. Multifilamentary character of anticorrelated capacitive and resistive switching in memristive structures based on (CoFeB)_x(LiNbO₃)_{100-x} nanocomposite // Physical Review Applied. Vol. 14. No. 3. Article 034016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.034016>

- Matsukatova A. N., Iliasov A. I., Nikiruy K. E., Kukueva E. V., Vasiliev A. L., Goncharov B. V., Sitnikov A. V., Zaveskin M. L., Bugaev A. S., Demin V. A., Rylkov V. V., Emelyanov A. V. 2022. Convolutional neural network based on crossbar arrays of $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ nanocomposite memristors // *Nanomaterials*. Vol. 12. No. 19. Article 3455. <https://doi.org/10.3390/nano12193455>
- Miranda E., Mehonic A., Suñé J., Kenyon A. J. 2013. Multi-channel conduction in redox-based resistive switch modelled using quantum point contact theory // *Applied Physics Letters*. Vol. 103. No. 22. Article 222904. <https://doi.org/10.1063/1.4836935>
- Nikiruy K. E., Emelyanov A. V., Demin V. A., Sitnikov A. V., Kashkarov P. K. 2018. A precise algorithm of memristor switching to a state with preset resistance // *Technical Physics Letters*. Vol. 44. No. 5. Pp. 416–419. <https://doi.org/10.1134/S106378501805022X>
- Nikiruy K. E., Emelyanov A. V., Demin V. A., Sitnikov A. V., Minnekhanov A. A., Rylkov V. V., Kashkarov P. K., Kovalchuk M. V. 2019. Dopamine-like STDP modulation in nanocomposite memristors // *AIP Advances*. Vol. 9. No. 6. Article 065116. <https://doi.org/10.1063/1.5111083>
- Zhuo Y., Midya R., Song W., Wang Z., Asapu S., Rao M., Lin P., Jiang H., Xia Q., Williams S.R. 2022. A dynamical compact model of diffusive and drift memristors for neuromorphic computing // *Advanced Electronic Materials*. Vol. 8. No. 8. Article 2100696. <https://doi.org/10.1002/aelm.202100696>

References

- Asapu, S., & Maiti, T. (2017). Multifilamentary conduction modeling in transition metal oxide-based RRAM. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 64(8), 3145–3150. <https://doi.org/10.1109/TED.2017.2709249>
- Bussygin, A., Udovichenko, S., Ebrahim, A., Bobylev, A., & Gubin, 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>
- Chee, H. L., Nandha, K. T., & Almurib, H. A. (2018). Multifilamentary conduction modeling of bipolar Ta₂O₅/TaO_x bi-layered RRAM. In *IEEE 7th Non-Volatile Memory Systems and Applications Symposium (NVM-SA)* (pp. 113–114). <https://doi.org/10.1109/NVM-SA.2018.00029>
- González-Cordero, A., Roldan, J. B., Jiménez-Molinos, F., Suñé, J., Long, S., & Liu, M. (2016). A new compact model for bipolar RRAMs based on truncated-cone conductive filaments — A Verilog-A approach. *Semiconductor Science and Technology*, 31(11), Article 115013. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/11/115013>
- Martyshov, M. N., Emelyanov, A. V., Demin, V. A., Nikiruy, K. E., Minnekhanov, A. A., Nikolaev, S. N., Taldenkov, A. N., Ovcharov, A. V., Presnyakov, M. Yu., Sitnikov, A. V., Vasiliev, A. L., Forsh, P. A., Granovsky, A. B., Kashkarov, P. K., Kovalchuk, M. V., & Rylkov, V. V. (2020). Multifilamentary character of anticorrelated capacitive and resistive switching in memristive structures based on $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ nanocomposite. *Physical Review Applied*, 14(3), Article 034016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.034016>
- Matsukatova, A. N., Iliasov, A. I., Nikiruy, K. E., Kukueva, E. V., Vasiliev, A. L., Goncharov, B. V., Sitnikov, A. V., Zaveskin, M. L., Bugaev, A. S., Demin, V. A., Rylkov, V. V., & Emelyanov, A. V.

- (2022). Convolutional neural network based on crossbar arrays of $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ nanocomposite memristors. *Nanomaterials*, 12(19), Article 3455. <https://doi.org/10.3390/nano12193455>
- Miranda, E., Mehonic, A., Suñé, J., & Kenyon, A. J. (2013). Multi-channel conduction in redox-based resistive switch modelled using quantum point contact theory. *Applied Physics Letters*, 103(22), Article 222904. <https://doi.org/10.1063/1.4836935>
- Nikiruy, K. E., Emelyanov, A. V., Demin, V. A., Sitnikov, A. V., & Kashkarov, P. K. (2018). A precise algorithm of memristor switching to a state with preset resistance. *Technical Physics Letters*, 44(5), 416–419. <https://doi.org/10.1134/S106378501805022X>
- Nikiruy, K. E., Emelyanov, A. V., Demin, V. A., Sitnikov, A. V., Minnekhanov, A. A., Rylkov, V. V., Kashkarov, P. K., & Kovalchuk, M. V. (2019). Dopamine-like STDP modulation in nanocomposite memristors. *AIP Advances*, 9(6), Article 065116. <https://doi.org/10.1063/1.5111083>
- Zhuo, Y., Midya, R., Song, W., Wang, Z., Asapu, S., Rao, M., Lin, P., Jiang, H., Xia, Q. & Williams, S. R. (2022). A dynamical compact model of diffusive and drift memristors for neuromorphic computing. *Advanced Electronic Materials*, 8(8), Article 2100696. <https://doi.org/10.1002/aelm.202100696>

Информация об авторах

Абдулла Хайдар Абдо Ибрагим, аспирант кафедры прикладной и технической физики, Физико-технический институт, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; младший научный сотрудник лаборатории наноматериалов и нанoeлектроники Центра природовдохновенного инжиниринга, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
abdulla.ybragim@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1709-9882>

Алексей Александрович Губин, аспирант кафедры прикладной и технической физики, Физико-технический институт, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; научный сотрудник лаборатории наноматериалов и нанoeлектроники Центра природовдохновенного инжиниринга, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
a.a.gubin@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7814-8473>

Александр Николаевич Бусыгин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории наноматериалов и нанoeлектроники Центра природовдохновенного инжиниринга, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
a.n.busygin@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3439-8067>

Сергей Юрьевич Удовиченко, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной и технической физики, Физико-технический институт, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; научный руководитель Центра природовдохновенного инжиниринга, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
udotgu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3583-7081>

Information about the authors

Abdulla H. A. Ebrahim, Postgraduate Student, Department of Applied and Technical Physics, Institute of Physics and Technology, University of Tyumen, Tyumen, Russia; Junior Researcher,

Nanomaterials and Nanoelectronics Laboratory, Center for Nature-Inspired Engineering,
University of Tyumen, Tyumen, Russia
abdulla.ybragim@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1709-9882>

Alexey A. Gubin, Postgraduate Student, Department of Applied and Technical Physics, Institute
of Physics and Technology, University of Tyumen, Tyumen, Russia; Scientific Researcher,
Nanomaterials and Nanoelectronics Laboratory, Center for Nature-Inspired Engineering,
University of Tyumen, Tyumen, Russia
a.a.gubin@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7814-8473>

Alexander N. Busygin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher, Nanomaterials
and Nanoelectronics Laboratory, Center for Nature-Inspired Engineering, University of
Tyumen, Tyumen, Russia
a.n.busygin@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3439-8067>

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