

Мемконденсатор на основе структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$ для нейроморфных применений

И.Д. Кучумов,^{1,*} М.Н. Мартышов,¹ А.С. Ильин,¹ А.И. Новосельцев,²
Т.П. Савчук,² М.Б. Гринберг,³ П.А. Форш,¹ П.К. Кашкаров^{1,4}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»
Россия, 124498, Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1

³Общество с ограниченной ответственностью «Химтех»
Россия, 129626, Москва, Маломосковская ул., д. 22, стр. 1

⁴Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

(Поступила в редакцию 09.12.2025; подписана в печать 14.01.2026)

В данной работе представлена структура $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$, способная переключаться как между резистивными, так и между емкостными состояниями. По данным импедансной спектроскопии предположена эквивалентная электрическая цепь, которая объясняет резистивные переключения ростом филамента в слое оксида гафния и предполагает наличие слоя TiON в приконтактной области HfO_x/TiN , который может объяснить наличие сегнетоэлектрического переключения емкости. Емкостное окно при переключении емкости составляет 185 пФ, что дает увеличение емкости на 75%, а сопротивление при резистивном переключении возрастает в 10 раз. Эти особенности делают наш образец универсальной структурой, которая может быть как конденсатором, так и резистором с несколькими состояниями. Это позволяет кодировать больше информации в одной ячейке и создавать более сложные логические элементы. Также может быть решена проблема паразитных токов, что кардинально улучшает энергоэффективность и надежность масштабируемых массивов памяти.

PACS: 72.80.Ng УДК: 537.3

Ключевые слова: нейроморфные вычисления, оксид гафния, сегнетоэлектрики, мемристоры, мемконденсаторы.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.81.2610502](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.81.2610502)

ВВЕДЕНИЕ

В данный момент активно протекает переход в вычислительных системах от привычной архитектуры фон-Неймана к нейроморфным нейронным сетям [1], которые работают на тех же принципах, что и головной мозг человека, состоящий из нейронов и соединяющих их синапсов. Это позволяет современным нейронным сетям добиться значительных успехов в классификации и обработке данных и их генерации. Воссоздать работу синапса в нейроне можно с помощью мемристора [2–5]. Это простая структура металл–диэлектрик–металл, которая может менять свое сопротивление между несколькими значениями благодаря росту и разрушению проводящей нити — филамента — под действием внешнего напряжения. Эффект резистивного переключения был обнаружен в различных неорганических соединениях (TiO_2 , SiO_2 , ZnO и т.д. [6–8]), сложных нанокомпозитах [9], а также в органических полимерах [10, 11].

Кроме того, существуют структуры, обладаю-

щие емкостным переключением, которые также могут имитировать работу синапса. Для этого часто применяются сегнетоэлектрические слои, которые меняют собственную поляризацию под действием внешнего электрического поля [12]. В отличие от мемристоров они не выстраивают филаментов, что делает их переключения более надежными и энергоэффективными. Материалом, который обладает обоими видами переключений, является оксид гафния HfO_2 . Для образования сегнетоэлектрического эффекта в HfO_2 необходимо, чтобы его кристаллическая решетка находилась в полярной орторомбической фазе $\text{Pca}2_1$ [13]. Наличие и стабильность этой фазы зависит от множества производственных факторов [14], поэтому ученые все еще в поиске универсальных параметров нанесения сегнетоэлектрических пленок HfO_2 .

Обычно у сегнетоэлектриков в отсутствии напряжения емкость в разных состояниях одинакова. Для энергоэффективности чтение производится при малых напряжениях, поэтому важно иметь емкостное окно даже при 0 В. Этого можно добиться несколькими способами: выбрать для структуры металлические контакты с разной работой выхода, что создаст различие во внутреннем поле и, как следствие, сместит график емкости по напряжению

* E-mail:ikuchum@gmail.com

[12, 15] или, как продемонстрировал Луо и др. [16], дефекты вакансий кислорода на нижнем интерфейсе электрода TiN могут вызывать закрепление доменных стенок, и тоже соответствующим образом смещать график по напряжению даже при одинаковых контактах. В дополнение к перечисленным особенностям, HfO_2 совместим с КМОП-технологиями [17, 18], обладает высокой диэлектрической проницаемостью $k \sim 20$ [19, 20], а также не теряет своих свойств даже при уменьшении толщины до десятка нанометров [13, 21].

В данной работе изучается структура $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$, в которой сегнетоэлектрический слой оксида гафния получен методом магнетронного распыления. Проведен анализ вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик, который показывает возможность наших структур переключаться как между емкостными, так и между резистивными состояниями. Этот факт делает их универсальными кандидатами для построения нейронных сетей как на основе мемристоров, так и на основе мемконденсаторов. Кроме этого, становится возможно их применение в системах с переменным током и комбинацией обоих типов переключения для тонкой настройки при работе со сложными нейронными сетями.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследованные в работе структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$ были изготовлены на подложках монокристаллического кремния. Для нанесения слоев нитрида титана и оксида гафния использовалась установка магнетронного распыления УРМ-026. Слой TiN формировался посредством распыления титановой мишени в аргон-азотной смеси (давление азота 0.3×10^{-3} Торр, аргона 2.7×10^{-3} Торр). Основной диэлектрический слой HfO_x толщиной около 40 нм создавался распылением гафниевой мишени чистотой 99.95% в атмосфере аргон-кислородной смеси (давление кислорода 2.5×10^{-3} Торр, давление аргона 0.5×10^{-3} Торр). Верхние титановые электроды осаждались через теневую маску на системе магнетронного напыления DST3, закупленной в рамках проекта «Наука и университеты» (контракт № 1599-44-2024 от 15.11.2024 г.).

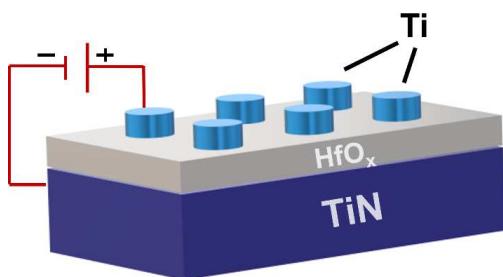


Рис. 1. Схематичное изображение структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$

На рис. 1 схематично изображено устройство мемконденсатора на основе оксида гафния со структурой $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$.

Вольт-амперные характеристики структур мемконденсатора измерялись с помощью установки на основе источника измерителя Keithley 2401. Измерения вольт-фарадных характеристик на переменном токе осуществлялись на импеданс анализаторе HP 4192A при частоте 1 кГц, а измерения частотных зависимостей импеданса проводилась в диапазоне частот от 5 Гц до 13 МГц.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 изображена вольт-амперная характеристика структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$. При обратном проходе, при значении напряжения $U = -2.6$ В заметен пик, связанный с сегнетоэлектрическим эффектом: когда напряжение достигает критического значения происходит лавинное выстраивание поляризации основного количества доменов по направлению электрического поля. Это и есть момент максимальной скорости изменения поляризации, а вклад в основной ток со стороны поляризации пропорционален dP/dt , который и регистрируется как пик на графике вольт-амперной характеристики. Также можно отметить, что в области положительных значений напряжения данный пик практически не выражен, что указывает на существование необходимой асимметрии в системе. Наличие тока при нулевом смещении является следствием инерционности процесса переориентации дипольных моментов в материале.

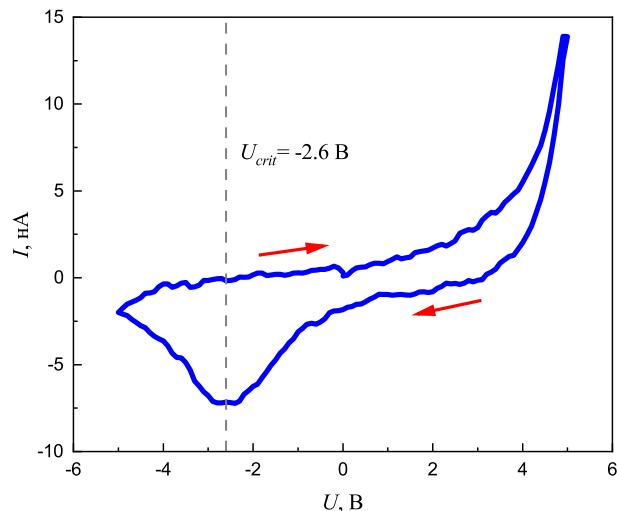


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$

Наличие сегнетоэлектрического эффекта позволяет изменять емкость мемконденсатора при приложении электрического напряжения, что и обнаруживается на вольт-фарадной характеристике (рис. 3). На графике, измеренном в диапазоне от

–5 до 5 В при частоте тока 1 кГц, мы видим два отчетливо различимых состояния емкости, которые можно воспринимать как C_{on} — высокоемкостное и C_{off} — низкоемкостное состояния.

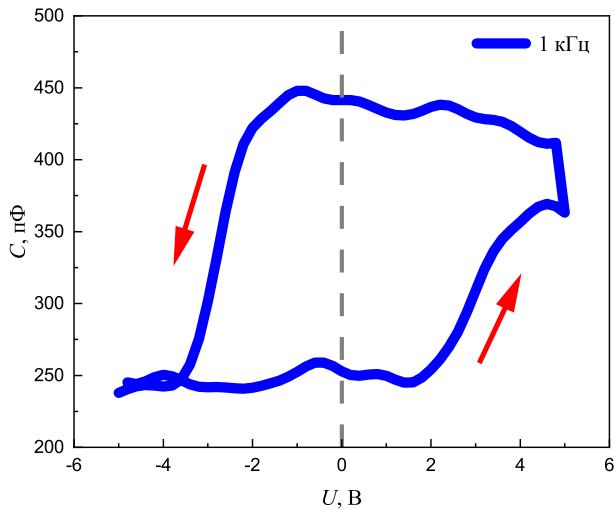


Рис. 3. Вольт-фарадная характеристика структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$

Основным параметром, характеризующим переключение емкости, является емкостное окно — разность значений емкости в состояниях C_{on} и C_{off} при нулевом напряжении и напряжение сдвига, при котором емкости в этих состояниях выравниваются. Для исследуемой структуры емкостное окно составляет 185 пФ, а напряжение сдвига — около –3.5 В. Обычно изменение емкости в подобных системах связывают с резким изменением диэлектрической проницаемости (ϵ) слоя HfO_x при достижении коэрцитивного поля, когда происходит коллективное переключение сегнетоэлектрических доменов. В различные моменты времени и при разных приложенных напряжениях материал демонстрирует различную чувствительность к изменению электрического поля, что приводит к наблюдаемому изменению емкости.

Асимметрия С–V-характеристик обусловлена защемлением доменных стенок на дефектах V_o^{2+} в приконтактном слое TiON , а также наличием встроенного потенциала, возникающего из-за разницы работ выхода металлических электродов. При квазистатическом измерении тока двухпиковое увеличение емкости связано с переворотом доменов; при этом более высокий пик на обратном ходе, по сравнению с прямым, объясняется тем, что домены, зафиксированные в поляризации «вверх», индуцируют больше доменных стенок, когда обратная напряженность поля стремится переключить их вниз [16, 22].

Кроме емкостного переключения, в исследованных структурах был обнаружен эффект резистивного переключения (рис. 4). Сначала образец, имеющий сопротивление порядка 1 ГОм, претерпевает процесс формовки филамента при 10.5 В, переходя в низкорезистивное состояние R_{off} с сопро-

тивлением 10 кОм. После формовки образец переключается при значительно меньшем напряжении, равном 2 В, между высокорезистивным состоянием $R_{on} = 100$ кОм и низкорезистивным $R_{off} = 10$ кОм. Этот эффект объясняется тем, что для формирования основного филамента необходимо большое напряжение, последующая подача небольшого отрицательного напряжения не будет убирать филамент полностью, лишь размыкая его. Поэтому переход между R_{on} и R_{off} может происходить при значительно меньших напряжениях, делая наш образец в разы энергоэффективнее.

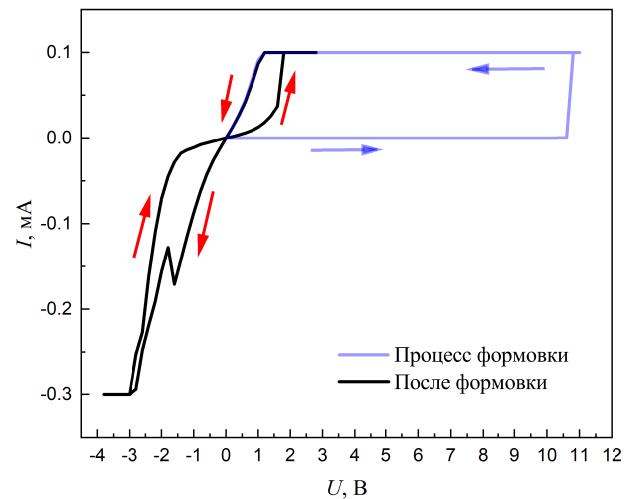


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$ до и после формовки филамента

В дополнение к этому были измерены годографы импеданса, то есть зависимость мнимой части импеданса $\text{Im}Z$ от действительной его части $\text{Re}Z$ до и после процесса формовки филамента (рис. 5). До формовки график выглядит как полуокружность с центром на горизонтальной оси и вертикальная линия, а после формирования вертикальная линия также превращается в полуокружность. Предположена эквивалентная цепь, позволяющая аппроксимировать данные зависимости (рис. 6). В случае до формирования филамента получаем, что между контактами находится два последовательно соединенных высокомомных слоя, описываемых параллельной RC-цепочкой; примечательно, что при рассмотрении подобной структуры, но с золотым нижним контактом, второй полуокружности не наблюдалось [3]. После формирования филамента параметры первого из слоев не меняются, в то время как на втором сопротивление сильно уменьшается, что может быть объяснено параллельным подключением филамента к этому слою; значения всех параметров записаны в таблице. Таким образом, можно предположить, что первый неактивный слой — приконтактный слой TiON , образующийся при насыщении гафния в среде кислорода на нижний контакт TiN , а второй — активный слой оксида гафния, в котором вырастает филамент.

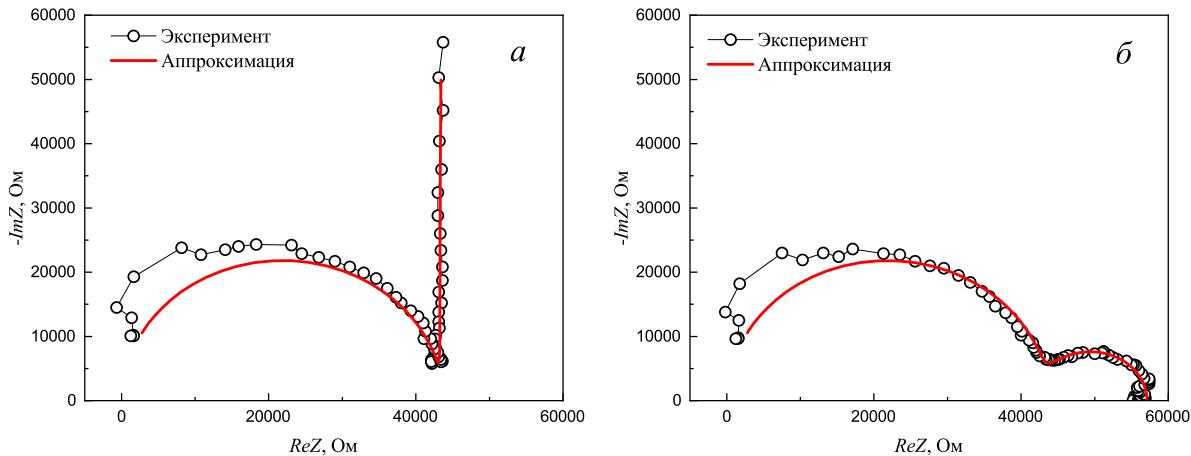


Рис. 5. Годографы структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$: *а* — до и *б* — после процесса формовки филамента

Таблица. Значения параметров эквивалентной электрической цепи структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$ до и после процесса формовки филамента

	R_k	R_{TiON}	C_{TiON}	R_{HfO_x}	C_{HfO_x}	R_f
До формовки	50 Ом	43 кОм	230 пФ	18 МОм	1.1 пФ	—
После формовки	50 Ом	43 кОм	230 пФ	18 МОм	1.1 пФ	13 кОм

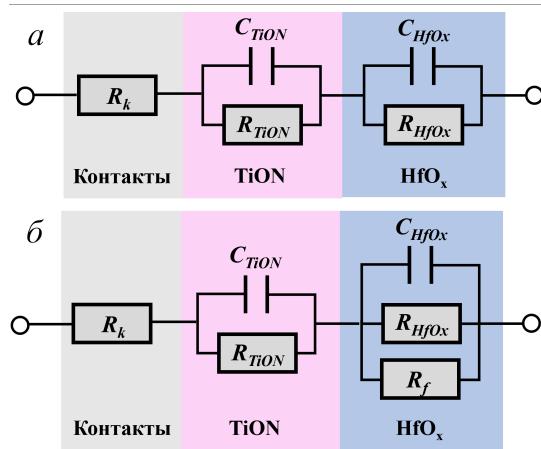


Рис. 6. Эквивалентные структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$: *а* — до и *б* — после процесса формовки филамента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были изучены структуры $\text{Ti}/\text{HfO}_x/\text{TiN}$, в которой активный слой сегнетоэлектрического оксида гафния был получен методом магнетронного распыления мишени Hf. Полученные данные демонстрируют наличие как мемри-

стивных, так и мемконденсаторных переключений. При переключениях емкости на переменном токе с частотой 1 кГц емкостное окно составляло 185 пФ, что дает увеличение на 75% по сравнению с первоначальным состоянием. Для резистивных переключений понадобился процесс формовки филамента при 10.5 В, после которого структура обладает двумя резистивными состояниями 100 кОм и 10 кОм, переход между которыми происходит при напряжении 2 В. Данные годографов позволили составить эквивалентную цепь структуры, обнаруживающую наличие неактивного слоя, последовательно соединенного с активным слоем HfO_x . Этот неактивный слой может быть приконтактным слоем TiON , который и влияет на наличие сегнетоэлектрического эффекта в HfO_2 . Таким образом, наши структуры являются универсальными кандидатами для построения нейронных сетей как на основе мемристоров, так и на основе мемконденсаторов. Кроме этого, становится возможно их применение в системах с переменным током и комбинацией обоих типов переключения для тонкой настройки при работе со сложными нейронными сетями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00268, <https://rscf.ru/project/23-19-00268/>.

- [1] Marković D., Mizrahi A., Querlioz D., Grollier J. // *Nat Rev Phys*, **2**, 499 (2020).
 [2] Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. // *Nature*, **453**, 80 (2008).

- [3] Мартышов М.Н., Кучумов И.Д., Швецов Б.С. и др. // *Российские нанотехнологии*, **20**, №1, 108 (2025). (Martyshov M.N., Kuchumov I.D., Shvetsov B.S., Zhigunov D.M. et al. // *Nanotechnol*

- Russia, **20**, 88 (2025).).
- [4] *Miranda E., Suñé J.* // *Materials*, **13**, 938 (2020).
- [5] *Iliasov A.I., Emelyanov A.V., Rylkov V.V., Matsukatova A.N. et al.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **58**, 365305 (2025).
- [6] *Ismail M., Rasheed M., Mahata C., Kang M. et al.* // *Journal of Alloys and Compounds*, **960**, 170846 (2023).
- [7] *Xiao M., Musselman K.P., Duley W.W., Zhou Y.N.* // *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 4808 (2017).
- [8] *Ilin A.S., Forsh P.A., Balakshin Yu.V., Shvetsov B.S. et al.* // *Appl. Phys. Lett.*, **126**, 143508 (2025).
- [9] *Martyshov M.N., Emelyanov A.V., Demin V.A., Nikiruy K.E. et al.* // *Phys. Rev. Applied*, **14**, 034016 (2020).
- [10] *Shvetsov B.S., Matsukatova A.N., Minnekhanov A.A., Nesmehov A.A. et al.* // *Tech. Phys. Lett.*, **45**, 1103 (2019).
- [11] Швецов Б.С., Емельянов А.В., Миннеканов А.А. и др. // *Российские нанотехнологии*, **14**, №1-2, 85 (2019)
(*Shvetsov B.S., Emelyanov A.V., Minnekhanov A.A., Nikiruy K.E. et al.* // *Nanotechnol Russia*, **14**, 1 (2019)).
- [12] *Wang X., Ye S., Cui B., Li Y.-C. et al.* // *Nano Energy*, **140**, 111011 (2025).
- [13] *Schroeder U., Park M.H., Mikolajick T., Hwang C.S.* // *Nat Rev Mater*, **7**, 653 (2022).
- [14] *Hsain H.A., Lee Y., Materano M., Mittmann T. et al.* // *Journal of Vacuum Sci. & Technol. A*, **40**, 010803 (2022).
- [15] *Gogi V.K., Chae C., Hwang J., Jha R.* // *MRS Commun.*, **15**, 285 (2025).
- [16] *Luo Y.-C., Hur J., Wang T.-H., Lu A. et al.* // *In 2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 1 (2021).
- [17] *Skopin E.V., Guillaume N., Alrifai L., Gonon P. et al.* // *Appl. Phys. Lett.*, **120**, 172901 (2022).
- [18] *Das D., Khan A.I.* // *IEEE Nanotechnology Mag.*, **15**, 20 (2021).
- [19] *Chalker P.R., Werner M., Romani S., Potter R.J. et al.* // *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 182911 (2008).
- [20] *Taechakumput P., Taylor S., Buiu O., Potter R.J. et al.* // *Microelectronics Reliability*, **47**, 825 (2007).
- [21] *Pavlikov A.V., Kuchumov I.D., Martyshov M.N., Zhigunov D.M. et al.* // *Phys. Solid State*, **66**, 557 (2024).
- [22] *Luo Y.-C., Lu A., Hur J., Li S. et al.* // *In 2021 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, 1 (2021).

Ti/HfO_x/TiN-Based Memcapacitor for Neuromorphic Applications

I.D. Kuchumov^{1,a}, M.N. Martyshov¹, A.S. Ilyin¹, A.I. Novoseltsev², T.P. Savchuk²,
M.B. Grinberg³, P.A. Forsh¹, P.K. Kashkarov^{1,4}

¹ Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

² National Research University of Electronic Technology. Moscow, 124498, Zelenograd, Russia

³ Research and Production company «Chemtech» Moscow 129626, Russia

⁴ National Research Center «Kurchatov Institute». Moscow, 123182, Russia

E-mail: ^aikuchum@gmail.com

This paper presents a Ti/HfO_x/TiN structure capable of switching between both resistive and capacitive states. Impedance spectroscopy data suggest an equivalent electrical circuit that explains the resistive switching by the growth of a filament in the hafnium oxide layer and suggests the presence of a TiON layer in the HfO_x/TiN contact region, which may explain the ferroelectric capacitance switching. The capacitive switching window is 185 pF, resulting in a 75% increase in capacitance, while the resistance during resistive switching increases tenfold. These features represent an example of a versatile structure that can function as both a capacitor and a multi-state resistor. This enables encoding more information in a single cell and the creation of more complex logic elements. The problem of parasitic currents can also be solved, dramatically improving the energy efficiency and reliability of scalable memory arrays.

PACS: 72.80.Ng

Keywords: neuromorphic computing, hafnium oxide, ferroelectrics, memristors, memcapacitors.

Received 09 December 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2026. **81**, No. 1. Pp. .

Сведения об авторах

- Кучумов Иван Дмитриевич — аспирант; тел.: (495) 939-39-22, e-mail: ikuchum@gmail.com.
- Мартышов Михаил Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; тел.: (495) 939-39-22, e-mail: mmartyshov@mail.ru.
- Ильин Александр Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; тел.: (495) 939-39-22, e-mail: as.ilin@physics.msu.ru.
- Новосельцев Александр Иванович — аспирант; тел.: (495) 939-39-22, e-mail: aleks.novoselcev1999@gmail.com.
- Савчук Тимофей Павлович — канд. физ.-мат. наук; тел.: (495) 939-39-22, e-mail: tamlon555@yandex.ru.
- Гринберг Максим Борисович — оператор ИТ ООО «ХИМТЕХ»; e-mail: luckygrinberg@gmail.com.
- Форш Павел Анатольевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-39-22, e-mail: phorsh@mail.ru.
- Кашкаров Павел Константинович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-39-22, e-mail: p.kashkarov@mail.ru.