

### Раздел III. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.38-022.532

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-200-207

**Р.В. Томинов, З.Е. Вакулов, В.И. Варганов, И.О. Игнатьева, В.А. Смирнов**

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СИНАПТИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕМРИСТИВНЫХ CROSS-POINT СТРУКТУР ДЛЯ НЕЙРОМОРФНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Показаны результаты многоуровневого резистивного переключения и синаптической пластичности нейроноподобного мемристивного cross-point на основе нанокристаллической пленки оксида цинка. Показано, что при изменении амплитуды и длительности входных импульсов мемристивный cross-point демонстрирует 6 резистивных состояний с сопротивлением от  $4,27 \times 10^5$  Ом до  $8,34 \times 10^7$  Ом. Показано, что энергия переключения некоторых синаптических уровней составляет единицы пикоджоулей, что перспективно для создания компактных маломощных нейроморфных систем. Так, показано, что нанокристаллические пленки ZnO обладают синаптической пластичностью, т.е. при приложении импульсов напряжения различной амплитуды и длительности могут переключаться в широком диапазоне синаптических уровней. Изготовленный мемристивный cross-point демонстрирует парно-импульсную потенциацию PPF при  $t_p$  от 1 мс до 10 мс и парно-импульсную депрессию PPD при  $t_p$  от 50 мс до 100 мс. Анализ полученных экспериментальных результатов исследования PPF и PPD показал, что увеличение количества импульсов с 10 до 90 приводит к увеличению постсинаптического тока EPSC от 32 мкА до 73 мкА для  $t_p = 1$  мс, от 31 мкА до 59 мкА для  $t_p = 5$  мс, от 31 мкА до 48 мкА для  $t_p = 10$  мс, а также уменьшению EPSC от 30 мкА до 25 мкА для  $t_p = 50$  мс, от 30 мкА до 17 мкА для  $t_p = 70$  мс, от 30 мкА до 5 мкА для  $t_p = 100$  мс. Из полученных результатов следует, что чем короче интервал между импульсами, тем выше индекс PPF, поэтому можно сделать вывод, что изготовленная мемристивный cross-point на основе нанокристаллических пленок ZnO имитирует кратковременную пластичность биологического синапса, в котором пластичность PPF и PPD определяется концентрацией ионов  $Ca^{2+}$  и который играет ключевую роль во многих биологических функциях мозга, таких как локализация источника звука, распознавание образов, ассоциативное обучение, фильтрация ненужной информации. Полученные результаты могут быть использованы для аппаратной реализации нейронных сетей, нейроморфных структур робототехнических комплексов, протезов и систем искусственного интеллекта.

Нанозлектроника; нейроморфные системы; искусственный интеллект; ReRAM; мемристивный cross-point; синаптическая пластичность; нанокристаллическая пленка ZnO; импульсное лазерное напыление.

**R.V. Tominov, Z.E. Vakulov, V.I. Varganov, I.O. Ignatieva, V.A. Smirnov**

#### INVESTIGATION OF SYNAPTIC PLASTICITY IN MEMRISTIVE CROSS-POINT STRUCTURES FOR NEUROMORPHIC ROBOTIC SYSTEMS

The results show multilevel resistive switching and synaptic plasticity of a memristive cross-point based on a nanocrystalline zinc oxide film. It is shown that with a decrease in the amplitude and duration of input pulses, the memristive cross-point demonstrates resistive states from  $4.27 \times 10^5$  Ohm to  $8.34 \times 10^7$  Ohm. It is shown that the switching energy of some synaptic levels is picojoules, which is promising for creating compact low-power neuromorphic systems. Thus, it is shown that nanocrystalline ZnO films have synaptic plasticity, i.e. When applying voltage pulses, large limits and duration can vary depending on the synaptic levels. The fabricated memristive cross-point demonstrates paired-pulse facilitation PPF at  $t_p$  from 1 ms to 10 ms and pair-pulse depression PPD at  $t_p$  from 50 ms to 100 ms. The analysis of the experimental results of the PPF and PPD study showed that an increase in the number of pulses from 10 to 90 leads to an increase in postsynaptic current EPSC from 32  $\mu$ A to 73  $\mu$ A for  $t_p = 1$  ms, from 31  $\mu$ A to 59  $\mu$ A for  $t_p = 5$  ms, from 31  $\mu$ A to 48  $\mu$ A for  $t_p = 10$  ms, and a decrease in EPSC from 30  $\mu$ A to 25  $\mu$ A for  $t_p = 50$  ms, from 30  $\mu$ A to 17  $\mu$ A for  $t_p = 70$  ms,

from 30  $\mu\text{A}$  to 5  $\mu\text{A}$  for  $t_p = 100$  ms. From the obtained results it follows that the interval between pulses, the higher the PPF index, thus it can be concluded that the manufactured memristive cross-point based on ZnO nanocrystalline films imitates the crucial plasticity of the biological synapse, in which the plasticity of PPF and PPD is determined by the concentration of  $\text{Ca}^+$  ions and which plays a role in many biological functions of the brain, such as determining the key source of sound, pattern recognition, associative learning, filtering unnecessary information. The obtained results can be used for hardware implementation of neural networks, neuromorphic structures of robotic complexes, prostheses and artificial intelligence systems.

*Nanoelectronics; neuromorphic systems; artificial intelligence; ReRAM; memristive cross-point; synaptic plasticity; nanocrystalline ZnO film; pulsed laser deposition.*

**Введение.** В настоящее время нейронные сети все чаще используются для решения ряда задач, которые во многом превосходят линейные вычисления в распознавании образов, прогнозировании здоровья, прогнозировании погоды и других задачах, связанных с неточно заданными зашумленными данными [1–4]. Такие нейронные сети обычно реализуются в виде программного кода с использованием вычислительных систем на основе архитектуры фон Неймана [5–7]. При этом быстродействие алгоритмов такого программного обеспечения недостаточно из-за необходимости постоянного обмена большим объемом данных между процессорами и памятью (проблема «бутылочного горлышка»). Фактическим решением этой проблемы является аппаратная реализация мемристивных наноструктур, которые могут быть использованы для создания нейроморфных вычислительных систем, имитирующих работу биологического мозга [8–11]. В этом случае синапсы нейроморфной системы могут быть реализованы с использованием мемристивных структур, способных переключаться в широком диапазоне электрического сопротивления, что аналогично значению веса биологического синапса. Мемристорные структуры представляют собой элементы памяти в виде пленочных ячеек (нейронов) из оксидов переходных металлов, соединенных перекрестными информационными синапсами [12–15]. Эти элементы обладают малыми геометрическими размерами, высокой степенью интеграции, высокой производительностью и низким энергопотреблением, что позволяет имитировать массивный параллелизм и маломощные вычисления, характерные для человеческого мозга. Аппаратная реализация нейроморфной системы позволит существенно повысить эффективность работы нейронной сети как по быстродействию, так и по энергоэффективности, а также позволит масштабировать отдельные блоки процессоров нейронной сети для создания единой системы, аналогичной биологическому мозгу, отдельные области которого регулируют работу внутренних органов, отвечая за слух, зрение, координацию и т.д. [16–18]. Одним из основных способов технической «реализации» биологического мозга является производство интегральных схем на основе мемристорных структур, представляющих собой элементы памяти в виде пленочных ячеек (нейронов) из оксидов переходных металлов, соединенных перекрестными информационными синапсами (мемристивный cross-point). Анализ источников информации показал, что перспективными являются структуры на основе бинарных оксидов металлов, в частности нанокристаллического оксида цинка (ZnO), получаемого методом импульсного лазерного осаждения (PLD) [19–22]. При этом технология формирования нанокристаллического ZnO совместима с кремниевой технологией производства элементов микро- и нанoeлектроники. Однако, несмотря на значительный прогресс и публикационную активность, в настоящее время отсутствуют детальные исследования многоуровневого резистивного переключения, а также синаптической пластичности нейроподобных мемристивных наноструктур на основе нанокристаллических пленок оксида цинка.

Целью данной работы является экспериментальное исследование зависимости многоуровневого резистивного переключения от  $U_{\text{set}}$  и  $t_p$ , а также парно-импульсной потенции (PPF) и парно-импульсной депрессии (PPD) в мемристивном cross-point на основе нанокристаллической пленки ZnO.

**Методика эксперимента.** Активный слой мемристивного cross-point'a изготавливался на основе нанокристаллической пленки ZnO методом импульсного лазерного осаждения (Pioneer 180, Neosera LCC, США). В качестве подложек использовались пластины Si/SiO<sub>2</sub>. Давление кислорода составляло 10<sup>-5</sup> Торр, расстояние мишень-подложка 55 мм, температура подложки 370 °С, частота лазерных импульсов: 10 Гц, количество лазерных импульсов: 22000. Формирование верхних и нижних контактов осуществлялось методом классической фотолитографии (LITHO MASKLESS, Planck Inc, Южная Корея).

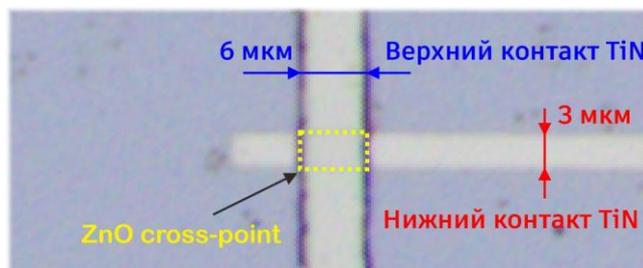


Рис. 1. Оптическое изображение макета мемристивной cross-point структуры на основе нанокристаллической пленки ZnO

Электрические измерения проводились с помощью полупроводникового анализатора параметров Keithley 4200-SCS (Keithley Instruments, США) и субмикронной зондовой системы EM-6070A (Planar, Республика Беларусь). Для исследования влияния напряжения  $U_{set}$  на многоуровневое резистивное переключение, на изготовленный мемристивный cross-point подавался пакет импульсов (рис. 2,а, вставка). После каждых 1000 измерений  $U_{set}$  увеличивали на 0,2 В. В результате была построена зависимость постсинаптического тока (EPSC) от номера импульса при  $U_{set}$  в диапазоне от 0,6 В до 1,6 В (рис. 2,а). Длительность импульса  $U_{set}$  и интервал между импульсами составляли 4 мс и 12 мс соответственно. На основании полученных результатов были построены зависимости сопротивления (R) и энергии переключения (E) от  $U_{set}$  (рис. 2,б,в).

Для исследования влияния длительности импульса ( $t_p$ ) на многоуровневое резистивное переключение также подавался пакет импульсов (рис. 3,а, вставка) на изготовленный мемристивный cross-point. После каждых 1000 измерений  $t_p$  увеличивалось на 1 мс. В результате была построена зависимость EPSC от номера импульса при  $t_p$  в диапазоне от 1 мс до 6 мс и  $U_{set} = 1$  В (рис. 3,а). На основании полученных результатов были построены зависимости R и E от  $t_p$  (рис. 3,б,в).

Для исследования PPF и PPD на мемристивный cross-point подавались пре- и постнейронные импульсы с разным  $t_p$ . На основании полученных результатов была построена зависимость EPSC от номера импульса для  $t_p$  в диапазоне от 1 мс до 100 мс (рис. 4,а). Зависимость индекса PPF от  $t_p$  была рассчитана по формуле, представленной на рис. 4,б.

**Результаты и обсуждение.** Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что увеличение  $U_p$  от 0,6 В до 1,6 В позволяет получить 6 резистивных состояний (1R1-1R6) в диапазоне сопротивлений от  $4,27 \times 10^5$  Ом до  $8,34 \times 10^7$  Ом с отношением сопротивлений 196 (рис. 2,а,б). Также анализ экспериментальных результатов показал, что увеличение  $U_p$  от 0,6 В до 1,6 В приводит к увеличению энергии резистивного переключения от  $1,3 \times 10^{-11}$  Дж до  $2,4 \times 10^{-8}$  Дж (рис. 2,в).

В свою очередь, увеличение длительности приложенных прямоугольных импульсов напряжения  $t_p$  от 1 мс до 6 мс позволяет получить 6 резистивных состояний (2R1-2R6) в диапазоне сопротивлений от  $1,92 \times 10^5$  Ом до  $2,57 \times 10^8$  Ом с отношением сопротивлений 1338 (рис. 3,а,б). Также увеличение  $t_p$  от 1 мс до 6 мс приводит к увеличению энергии резистивного переключения с  $6,2 \times 10^{-12}$  Дж до  $5,2 \times 10^{-8}$  Дж (рис. 3,в). Между  $U_p$ ,  $t_p$  и синаптическим уровнем нейроморфной структуры существует нелинейная связь. Полученные результаты могут быть использованы при решении задачи линейаризации уровней, т.е. модуляции параметров импульсов напряжения для формирования линейной зависимости синаптических уровней при обучении нейроморфной вычислительной системы. Также показано, что энергия переключения некоторых синаптических уровней составляет единицы пикоjouлей, что перспективно для создания компактных маломощных нейроморфных систем. Так, показано, что нанокристаллические пленки ZnO обладают синаптической пластичностью, т.е. при приложении импульсов напряжения различной амплитуды и длительности могут переключаться в широком диапазоне синаптических уровней.

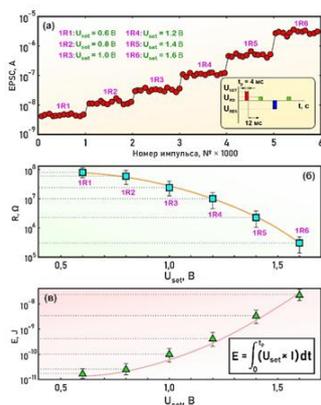


Рис. 2 Экспериментальные результаты исследования зависимости многоуровневого резистивного переключения от  $U_{set}$  в нанокристаллической пленке ZnO: а – EPSC от числа импульсов для разных  $U_{set}$ ; б – R от  $U_{set}$ ; в – E от  $U_{set}$

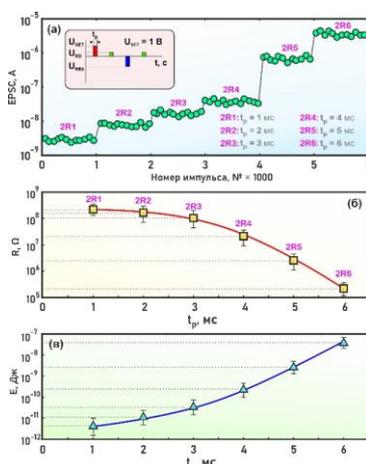


Рис. 3 Экспериментальные результаты зависимости многоуровневого резистивного переключения от  $t_p$  в нанокристаллической пленке ZnO: а – EPSC от числа импульсов для разных  $t_p$ ; б – R от  $t_p$ ; в – E от t

Анализ полученных экспериментальных результатов исследования PPF и PPD показал, что увеличение количества импульсов с 10 до 90 приводит к увеличению EPSC от 32 мкА до 73 мкА для  $t_p = 1$  мс, от 31 мкА до 59 мкА для  $t_p = 5$  мс, от 31 мкА до 48 мкА для  $t_p = 10$  мс, а также уменьшению EPSC от 30 мкА до 25 мкА для  $t_p = 50$  мс, от 30 мкА до 17 мкА для  $t_p = 70$  мс, от 30 мкА до 5 мкА для  $t_p = 100$  мс (рис. 4,а).

Таким образом, показано, что изготовленный мемристивный cross-point на основе нанокристаллической пленки ZnO демонстрируют парно-импульсную потенциацию PPF при  $t_p$  от 1 мс до 10 мс и парно-импульсную депрессию PPD при  $t_p$  от 50 мс до 100 мс. Этот результат можно объяснить накоплением пространственного заряда в случае малых значений  $t_p$  (до 10 мс), что приводит к увеличению EPSC, т.е. PPF, и рассасыванием пространственного заряда при  $t_p$  больше 50 мс, что приводит к уменьшению EPSC, т.е. PPD. Зависимость индекса PPF определялась по формуле для двух последовательных импульсов (рис. 4,б, вставка).

Показано, что увеличение  $t_p$  от 1 мс до 100 мс приводит к уменьшению индекса PPF со 187% до 26%. Из полученных результатов следует, что чем короче интервал между импульсами, тем выше индекс PPF, поэтому можно сделать вывод, что изготовленная мемристивный cross-point на основе нанокристаллических пленок ZnO имитирует крат-

ковременную пластичность биологического синапса, в котором пластичность PPF и PPD определяется концентрацией ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и который играет ключевую роль во многих биологических функциях мозга, таких как локализация источника звука, распознавание образов, ассоциативное обучение, фильтрация ненужной информации и т.д.

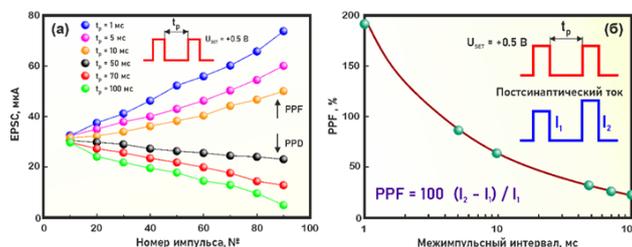


Рис. 4. Экспериментальные результаты исследования PPF и PPD в мемристивной cross-point структуры на основе нанокристаллической пленки оксида цинка: а – зависимость EPSC от числа импульсов для разных  $t_p$ ; б – зависимость PPF от  $t_p$

**Заключение.** В данной работе представлены результаты изготовления и исследования нейроноподобной мемристивной cross-point структуры на основе нанокристаллической пленки ZnO. Было показано, что увеличение  $U_p$  от 0,6 В до 1,6 В позволяет получить 6 резистивных состояний от  $4,27 \times 10^5$  Ом до  $8,34 \times 10^7$  Ом и позволяет увеличить энергию переключения от  $1,3 \times 10^{-11}$  Дж до  $2,4 \times 10^{-8}$  Дж. Кроме того, увеличение  $t_p$  от 1 мс до 6 мс позволяет получить 6 резистивных состояний от  $1,92 \times 10^5$  Ом до  $2,57 \times 10^8$  Ом. Изготовленный мемристивный cross-point демонстрирует парно-импульсную потенциацию при  $t_p$  от 1 мс до 10 мс и парно-импульсную депрессию при  $t_p$  от 50 мс до 100 мс. Полученные результаты могут быть использованы для аппаратной реализации нейронных сетей, нейроморфных структур робототехнических комплексов, протезов, систем искусственного интеллекта.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10272, <https://rscf.ru/project/23-79-10272/>, Южный федеральный университет (разработка и изготовление мемристивного cross-point на основе нанокристаллической пленки ZnO), а также в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах» (исследование многоуровневого резистивного переключения и синаптической пластичности).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Das S., Dey A., Pal A., & Roy N. Role of artificial intelligence and machine learning in nanosafety // Small. – 2020. – Vol. 16, No. 36. – P. 2001883.
2. Guo K., Yang Z., Yu C.H., Buehler M.J. Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials // Materials Horizons. – 2021. – Vol. 8, No. 4. – P. 1153-1172.
3. Demin V.A., Emelyanov A.V., Lapkin D.A., Erokhin V.V., Kashkarov P.K., Kovalchuk M.V. Neuromorphic elements and systems as the basis for the physical implementation of artificial intelligence technologies // Crystallography Reports. – 2016. – No. 1 (61). – P. 992-1001.
4. Томинов Р.В., Вакулов З.Е., Авилон В.И., Шиховцов И.А., Смирнов В.А. Исследование влияния материала контактов и толщины пленок на резистивное переключение в не требующих формовки нанокристаллических пленках ZnO для нейроморфных устройств на основе мемристорных структур // Наноиндустрия. – 2022. – Т. 15, № S8-2. – P. 509-515.
5. Щаников С.А., Борданов И.А., Зуев А.Д., Данилин С.Н., Королев Д.С., Белов А.И., Михайлов А.Н. Применение системного подхода при создании искусственных нейронных сетей на базе мемристоров // Нейрокомпьютеры и их применение. – 2020. – С. 18-23.
6. Rozhnova M.A., Pankratova E.V., Stasenko S.V., Kazantsev V.B. Bifurcation analysis of multistability and oscillation emergence in a model of brain extracellular matrix // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – No. 1 (151). – P. 111253.
7. Tominov R., Avilov V., Vakulov Z., Khakhulin D., Ageev O., Valov I., Smirnov V. Forming-Free Resistive Switching of Electrochemical Titanium Oxide Localized Nanostructures: Anodization, Chemical Composition, Nanoscale Size Effects, and Memristive Storage // Advanced Electronic Materials. – 2022. – No. 8 (8). – P. 2200215.

8. Тихов С.В., Гориков О.Н., Антонов И.Н., Тельбаум Д.И., Михайлов А.Н., Белов А.И., Морозов А.И. Особенности поведения МДП мемристоров с нанослоем Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, изготовленных на основе проводящей подложки Si // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, № 12. – С. 1436-1442.
9. Томинов Р.В., Вакулов З.Е., Авилов В.И., Смирнов В.А., Агеев О.А. Исследование резистивного переключения не требующих формовки нанокристаллических пленок оксида цинка для нейроморфных систем искусственного интеллекта // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S5-3. – С. 733-739.
10. Круглов А.В., Серов Д.А., Белов А.И., Коряжкина М.Н., Антонов И.Н., Зубков С.Ю., Гориков О.Н. Мемристоры для энергонезависимой резистивной памяти на основе двухслойного диэлектрика Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>(Y) // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94, № 11. – С. 1833-1842.
11. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Khakhulin D.A., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Ageev O.A. Synthesis and memristor effect of a forming-free ZnO nanocrystalline films // Nanomaterials. – 2020. – No. 5 (10). – P. 1007.
12. Смирнов В.А., Томинов Р.В., Авилов В.И., Алябьева Н.И., Вакулов З.Е., Замбург Е.Г., Агеев О.А. Исследование мемристорного эффекта в нанокристаллических пленках ZnO // Физика и техника полупроводников. – 2019. – № 1 (53). – С. 77-82.
13. Тихов С.В., Гориков О.Н., Антонов И.Н., Касаткин А.П., Королев Д.С., Белов А.И., Тельбаум Д.И. Изменение иммитанса при электроформовке и резистивном переключении в мемристивных структурах “металл–диэлектрик–металл” на основе SiO<sub>x</sub> // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, № 5. – С. 107-111.
14. Prezioso M., Merrikkh-Bayat F., Hoskins B.D., Adam G.C., Likharev K.K., Strukov, D.B. Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors // Nature. – 2015. – Vol. 521, No. 7550. – P. 61-64.
15. Белов А.И., Михайлов А.Н., Королев Д.С., Сергеев В.А., Антонов И.Н., Гориков О.Н., Тельбаум Д.И. Резистивное переключение в мемристивных структурах Au/SiO<sub>x</sub>/TiN/Ti с различными геометрическими параметрами и стехиометрией диэлектрической пленки // Письма в Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, № 10. – С. 17-24.
16. Смирнов В.А., Томинов Р.В., Авилов В.И., Агеев О.А. Исследование forming-free резистивного переключения нанокристаллических пленок оксида цинка для создания нейроморфных систем // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S4. – С. 581-582.
17. Тихов С.В., Шенгуров В.Г., Денисов С.А., Антонов И.Н., Круглов А.В., Белов А.И., Михайлов А.Н. Резистивное переключение в структурах металл–оксид–полупроводник с nanoостровками GeSi на подложке кремния // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90, № 10. – С. 1741-1749.
18. Gale E. TiO<sub>2</sub>-based memristors and ReRAM: materials, mechanisms and models (a review) // Semiconductor Science and Technology. – 2014. – No. 10 (29). – P. 104004.
19. Тихов С.В., Гориков О.Н., Белов А.И., Антонов И.Н., Морозов А.И., Коряжкина М.Н., Михайлов А.Н. Механизмы токопереноса и резистивного переключения в конденсаторах со слоями стабилизированного иттрием диоксида гафния // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89, № 6. – С. 927-934.
20. Yoon J.H., Wang Z., Kim K.M., Wu H., Ravichandran V., Xia Q., Yang J.J. An artificial nociceptor based on a diffusive memristor // Nature communications. – 2018. – Vol. 9, No. 1. – P. 417.
21. Филатов Д.О., Антонов Д.А., Антонов И.Н., Белов А.И., Баранова В.Н., Шенина М.Е., Гориков О.Н. Резистивное переключение мемристоров на основе стабилизированного диоксида циркония сложными сигналами // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62, № 4. – P. 556-561.
22. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Polupanov N.V., Saenko A.V., Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A. Nanoscale-Resistive Switching in Forming-Free Zinc Oxide Memristive Structures // Nanomaterials. – 2022. – No. 3 (12). – P. 455.

#### REFERENCES

1. Das S., Dey A., Pal A., & Roy N. Role of artificial intelligence and machine learning in nanosafety, *Small*, 2020, Vol. 16, No. 36, pp. 2001883.
2. Guo K., Yang Z., Yu C.H., Buehler M.J. Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials, *Materials Horizons*, 2021, Vol. 8, No. 4, pp. 1153-1172.
3. Demin V.A., Emelyanov A.V., Lapkin D.A., Erokhin V.V., Kashkarov P.K., Kovalchuk M.V. Neuromorphic elements and systems as the basis for the physical implementation of artificial intelligence technologies, *Crystallography Reports*, 2016, No. 1 (61), pp. 992-1001.
4. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Shikhovtsov I.A., Smirnov V.A. Issledovanie vliyaniya materiala kontaktov i tolshchiny plenok na rezistivnoe pereklyuchenie v ne trebuyushchikh formovki nanokristallicheskih plenkach ZnO dlya neyromorfnykh ustroystv na osnove memristornykh struktur [Study of the influence of contact material and film thickness on resistive switching in mold-free nanocrystalline ZnO films for neuromorphic devices based on memristor structures], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2022, Vol. 15, No. S8-2, pp. 509-515.

5. *Shchanikov S.A., Bordanov I.A., Zuev A.D., Danilin S.N., Korolev D.S., Belov A.I., Mikhaylov A.N.* Primenenie sistemnogo podkhoda pri sozdanih iskusstvennykh neyronnykh setey na baze memristorov [Application of a systems approach to creating artificial neural networks based on memristors], *Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye* [Neurocomputers and Their Application], 2020, pp. 18-23.
6. *Rozhnova M.A., Pankratova E.V., Stasenko S.V., Kazantsev V.B.* Bifurcation analysis of multistability and oscillation emergence in a model of brain extracellular matrix, *Chaos, Solitons & Fractals*, 2021, No. 1 (151), pp. 111253.
7. *Tominov R., Avilov V., Vakulov Z., Khakhulin D., Ageev O., Valov I., Smirnov V.* Forming-Free Resistive Switching of Electrochemical Titanium Oxide Localized Nanostructures: Anodization, Chemical Composition, Nanoscale Size Effects, and Memristive Storage, *Advanced Electronic Materials*, 2022, No. 8 (8), pp. 2200215.
8. *Tikhov S.V., Gorshkov O.N., Antonov I.N., Tetel'baum D.I., Mikhaylov A.N., Belov A.I., Morozov A.I.* Osobennosti povedeniya MDP memristorov s nanosloem Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, izgotovlennykh na osnove provodyashchey podlozhki Si [Features of the behavior of MIS memristors with a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanolayer, manufactured on the basis of a conductive Si substrate], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors], 2018, Vol. 52, No. 12, pp. 1436-1442.
9. *Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Smirnov V.A., Ageev O.A.* Issledovanie rezistivnogo pereklyucheniya ne trebuyushchikh formovki nanokristallicheskikh plenok oksida tsinka dlya neyromorfnykh sistem iskusstvennogo intellekta [Study of resistive switching of mold-free nanocrystalline zinc oxide films for neuromorphic artificial intelligence systems], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2020, Vol. 13, No. S5-3, pp. 733-739.
10. *Kruglov A.V., Serov D.A., Belov A.I., Koryazhkina M.N., Antonov I.N., Zubkov S.Yu., Gorshkov O.N.* Memristory dlya energonezavisimoy rezistivnoy pamyati na osnove dvukhsloynnogo dielektrika Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>(Y) [Memristors for non-volatile resistive memory based on a two-layer dielectric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>(Y)], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2024, Vol. 94, No. 11, pp. 1833-1842.
11. *Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Khakhulin D.A., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Ageev O.A.* Synthesis and memristor effect of a forming-free ZnO nanocrystalline films, *Nanomaterials*, 2020, No. 5 (10), pp. 1007.
12. *Smirnov V.A., Tominov R.V., Avilov V.I., Alyab'eva N.I., Vakulov Z.E., Zamburg E.G., Ageev O.A.* Issledovanie memristornogo effekta v nanokristallicheskikh plenkakh ZnO [Study of the memristor effect in nanocrystalline ZnO films], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors], 2019, No. 1 (53), pp. 77-82.
13. *Tikhov S.V., Gorshkov O.N., Antonov I.N., Kasatkin A.P., Korolev D.S., Belov A.I., Tetel'baum D.I.* Izmeneniye immitansa pri elektroformovke i rezistivnom pereklyuchenii v memristivnykh strukturakh "metall-dielektrik-metal" na osnove SiO<sub>x</sub> [Change in immittance during electroforming and resistive switching in memristive metal-insulator-metal structures based on SiO<sub>x</sub>], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2016, Vol. 86, No. 5, pp. 107-111.
14. *Prezioso M., Merrih-Bayat F., Hoskins B.D., Adam G.C., Likharev K.K., Strukov, D.B.* Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors, *Nature*, 2015, Vol. 521, No. 7550, pp. 61-64.
15. *Belov A.I., Mikhaylov A.N., Korolev D.S., Sergeev V.A., Antonov I.N., Gorshkov O.N., Tetel'baum D.I.* Rezistivnoe pereklyucheniye v memristivnykh strukturakh Au/SiO<sub>x</sub>/TiN/Ti s razlichnymi geometricheskimi parametrami i stekhiometriy dielektricheskoy plenki [Resistive switching in Au/SiO<sub>x</sub>/TiN/Ti memristive structures with different geometric parameters and stoichiometry of the dielectric film], *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Letters to the Journal of Technical Physics], 2016, Vol. 42, No. 10, pp. 17-24.
16. *Smirnov V.A., Tominov R.V., Avilov V.I., Ageev O.A.* Issledovanie forming-free rezistivnogo pereklyucheniya nanokristallicheskikh plenok oksida tsinka dlya sozdaniya neyromorfnykh sistem [Study of forming-free resistive switching of nanocrystalline zinc oxide films for creating neuromorphic systems], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2020, Vol. 13, No. S4, pp. 581-582.
17. *Tikhov S.V., SHengurov V.G., Denisov S.A., Antonov I.N., Kruglov A.V., Belov A.I., Mikhaylov A.N.* Rezistivnoe pereklyucheniye v strukturakh metall-oksid-poluprovodnik s nanoostrovkami GeSi na podlozhke kremniya [Resistive switching in metal-oxide-semiconductor structures with GeSi nanoislands on a silicon substrate], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2020, Vol. 90, No. 10, pp. 1741-1749.
18. *Gale E.* TiO<sub>2</sub>-based memristors and ReRAM: materials, mechanisms and models (a review), *Semiconductor Science and Technology*, 2014, No. 10 (29), pp. 104004.
19. *Tikhov S.V., Gorshkov O.N., Belov A.I., Antonov I.N., Morozov A.I., Koryazhkina M.N., Mikhaylov A.N.* Mekhanizmy tokoperenosa i rezistivnogo pereklyucheniya v kondensatorakh so sloyami stabilizirovannogo itriem dioksida gafniya [Mechanisms of current transport and resistive switching in capacitors with yttrium-stabilized hafnium dioxide layers], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2019, Vol. 89, No. 6, pp. 927-934.

20. Yoon J.H., Wang Z., Kim K.M., Wu H., Ravichandran V., Xia Q., Yang J.J. An artificial nociceptor based on a diffusive memristor, *Nature communications*, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 417.
21. Filatov D.O., Antonov D.A., Antonov I.N., Belov A.I., Baranova V.N., Shenina M.E., Gorshkov O.N. Rezistivnoe pereklyuchenie memristorov na osnove stabilizirovannogo dioksida tsirkoniya slozhnymi signalami [Resistive switching of memristors based on stabilized zirconium dioxide by complex signals], *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics], 2020, Vol. 62, No. 4, pp. 556-561.
22. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Polupanov N.V., Saenko A.V., Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A. Nanoscale-Resistive Switching in Forming-Free Zinc Oxide Memristive Structures, *Nanomaterials*, 2022, No. 3 (12), pp. 455.

**Томинов Роман Викторович** – Южный федеральный университет; e-mail: tominov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.; с.н.с.

**Вакулов Захар Евгеньевич** – Южный федеральный университет; e-mail: zvakulov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.; с.н.с.

**Варганов Вадим Ильич** – Южный федеральный университет; e-mail: varganov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; аспирант.

**Игнатьева Ирина Олеговна** – Южный федеральный университет; e-mail: iignateva@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.

**Смирнов Владимир Александрович** – Южный федеральный университет; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.; в.н.с.

**Tominov Roman Viktorovich** – Southern Federal University; e-mail: tominov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; senior researcher.

**Vakulov Zakhar Evgenievich** – Southern Federal University; e-mail: zvakulov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; senior researcher.

**Varganov Vadim Ilyich** – Southern Federal University; e-mail: varganov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; postgraduate student.

**Ignatieva Irina Olegovna** – Southern Federal University; e-mail: iignateva@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.

**Smirnov Vladimir Aleksandrovich** – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; leading researcher.

УДК 621.376

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-207-220

**А.С. Мамитов, К.Е. Румянцев**

### **ФОРМИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МОДУЛЯЦИЕЙ КВАДРАТУРНЫМ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫМ РАДИОСИГНАЛОМ**

*Применение широкополосного оптического усиления, волнового мультиплексирования, компенсации дисперсии оптического излучения, дифференциальной фазовой манипуляции позволяет обеспечить передачу данных со скоростью до 40 Гбит/с. Перспектива дальнейшего увеличения скорости передачи данных до 100 Гбит/с связана с применением многоуровневого формата модуляции радиосигналов на нескольких поднесущих частотах, модуляции излучения одного оптического квантового генератора радиосигналами на нескольких поднесущих частотах, балансного гомодинного детектирования когерентного оптического излучения и цифровой обработки радиосигналов. Символьная передача посредством квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) обеспечивает высокую скорость передачи данных. Известны исследования, где обосновано применение алгоритма генерации когерентного оптического излучения с одной боковой полосой с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. За счёт аппаратных нестабильностей возможно возникновение амплитудных и фазовых погрешностей, которые приводят к разбалансу квадратур. Эти неточности вызывают дополнительные ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут значительно ухудшить помехоустойчивость приёма. Целью настоящего исследования является анализ процесса формирования однополосного оптиче-*