

## Раздел IV. Машинное обучение и нейронные сети

УДК 621.382

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-205-214

**В.И. Авиллов, Л.А. Душина, Н.В. Полупанов, В.А. Смирнов**

### **АППАРАТНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ НА ОСНОВЕ МЕМРИСТИВНЫХ СТРУКТУР ОКСИДА ТИТАНА**

*Представлены результаты изготовления, обучения и исследования макета аппаратной нейронной сети, реализованного в виде кроссбар массива искусственных синапсов на основе мемристорных наноструктур электрохимического оксида титана. Был разработан макет полностью связанной нейронной сети, состоящей из четырех входных электродов, кроссбар массива 16 искусственных синапсов на основе наноструктур электрохимического оксида титана и четырех выходных электродов. Показано, что процесс протекания тока через такую структуру полностью соответствует математической модели нейронной сети. Были проанализированы различные реализации искусственных синапсов, позволяющие реализовать отрицательные «веса» нейронной сети и выбран один из оптимальных вариантов. На основе разработанной структуры был изготовлен макет полностью связанной нейронной сети с использованием технологий магнетронного распыления, оптической и зондовой литографии. Для обучения нейронной сети был разработан алгоритм переключения отдельных мемристоров, исключающий паразитное переключение соседних структур за счет возникновения тока утечки. Для демонстрации работы изготовленного макета нейронной сети была предложена задача классификации двух входных сигналов. Для реализации отрицательных «весов» каждый из входящих сигналов дублировался с отрицательной полярностью. Предполагается, что выходы обученной нейронной сети должны регистрировать: 1) превышение первого сигнала; 2) превышение второго сигнала; 3) оба высоких сигнала. Этап обучения и исследования нейронной сети осуществлялся с использованием программно-аппаратного комплекса «Neuro InT», разработанного в научно-исследовательской лаборатории «Нейроэлектроника и мемристоривные наноматериалы», ЮФУ. Исследование макета нейронной сети показало, что все выходы успешно классифицируют входящие сигналы, максимизируя ток через соответствующие выходы для заданных входных значений. Предложенную структуру можно улучшить, добавив дополнительные два входа с постоянным высоким положительным и отрицательным потенциалом для реализации «сдвига» при работе нейронной сети. Полученные результаты могут быть использованы при разработке аппаратных нейронных сетей на основе мемристоривных структур оксида титана.*

*Нанотехнологии; нейроэлектроника; аппаратные нейронные сети; робототехника; мемристоривные структуры.*

**V.I. Avilov, L.A. Dushina, N.V. Polupanov, V.A. Smirnov**

### **HARDWARE NEURAL NETWORK BASED MEMRISTIVE TITANIUM OXIDE STRUCTURES**

*The paper presents the results of manufacturing, training and research of a hardware neural network prototype implemented as a crossbar array of artificial synapses based on memristor nanostructures of electrochemical titanium oxide. A prototype of a fully connected neural network was developed, consisting of four input electrodes, a crossbar array of 16 artificial synapses based on electrochemical titanium oxide nanostructures and four output electrodes. It is shown that the process of current flow through such a structure fully corresponds to the mathematical model of the neural network. Various implementations of artificial synapses that allow the implementation of negative "weights" of the neural network were analyzed and one of the optimal options was selected. Based on the developed structure, a prototype of a fully connected neural network was manufactured using magnetron sputtering, optical lithography and nanolithography technologies using scanning probe microscopy methods. To train the neural network, an algorithm for switching individual memristors was developed, eliminating parasitic switching of neighboring*

structures due to the occurrence of leakage current. To demonstrate the operation of the manufactured neural network model, a task of classifying two input signals was proposed. To implement negative "weights", each of the incoming signals was duplicated with negative polarity. It is assumed that the outputs of the trained neural network should register: 1) the excess of the first signal; 2) the excess of the second signal; 3) both high signals. The training and research of the neural network was carried out using the hardware and software complex "Neuro InT", developed by the staff of the Research Laboratory "Neuroelectronics and Memristive Nanomaterials", SFedU. Research of the neural network model showed that all outputs successfully classify incoming signals, maximizing the current through the corresponding outputs for the given input values. The proposed structure can be improved by adding two additional inputs with a constant high positive and negative potential to implement a "shift" during the operation of the neural network. The obtained results can be used in the development of technological foundations for the formation of hardware neural networks based on memristor titanium oxide nanostructures.

Nanotechnology; neuroelectronics; hardware neural networks; robotics; memristive structures.

**Введение.** Развитие современного искусственного интеллекта связано с развитием вычислительных способностей компьютеров. При этом для качественного развития требуется разработка и внедрение новых архитектур вычислительных устройств, отличных от архитектуры фон Неймана [1–3]. Одним из таких направлений являются нейроморфные вычисления, принцип которых построен на биологических нейронах и передачи импульса через синапсы [4, 5]. Похожую структуру можно реализовать с помощью кроссбар массивов искусственных синапсов на основе мемристоров, способных изменять свое сопротивление и, соответственно, в большей или меньшей степени передавать электрический импульс от одного слоя аппаратной нейронной сети к другому. Наиболее подходящим материалом для изготовления таких синапсов является электрохимический оксид титана. Мемристоры на его основе проявляют воспроизводимое переключение между различными состояниями [6–18]. Численное моделирование показало, что в процессе формирования таких структур образуется достаточная концентрация кислородных вакансий, принимающих участие в процессе резистивного переключения [19–22]. Таким образом, актуальной задачей является изготовление макета аппаратной нейронной сети на основе кроссбар массивов мемристивных структур оксида титана.

**Разработка и изготовление макета аппаратной нейронной сети.** Структура нейронной сети подразумевает наличие нескольких слоев, каждый из которых состоит из пренейронов, синапсов и постнейронов. В пределах одного слоя нейронной сети каждый из пренейронов соединен с каждым постнейроном через отдельный синапс, который в большей или меньшей степени пропускает сигнал. Такую схему можно реализовать с помощью кроссбар-массивов мемристоров, в которой каждый вход через отдельный синапс соединен с каждым выходом, при этом проводимость мемристора будет по аналогии с «весом» синапса в большей или меньшей степени пропускать электрический ток (рис. 1).

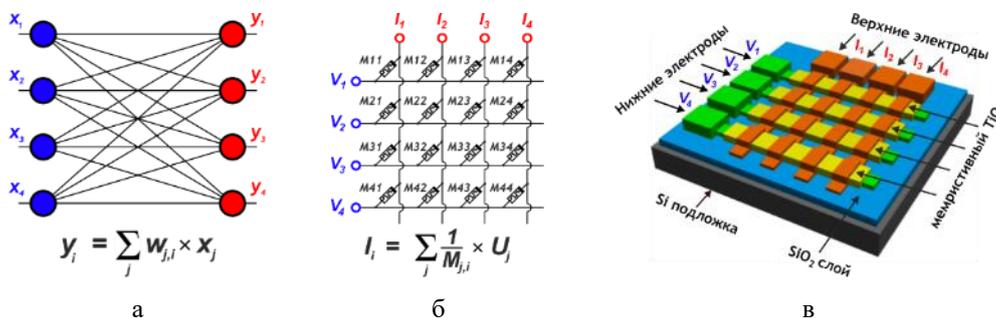


Рис. 1. Реализация топологии нейронной сети: а – математическая модель нейронной сети, б – электрическая схема кроссбар массива мемристоров, в – топология кроссбар-массива мемристоров.

Следует отметить, что в программных нейронных сетях в качестве «веса» используются численные коэффициенты, которые могут принимать в том числе и отрицательные значения. Однако простая кроссбар структура не позволяет инвертировать входной сигнал, когда это необходимо. Для реализации отрицательных «весов» могут быть применены разные методы. В самом простом случае может быть использование дублирование каждого входного сигнала с обратной полярностью, в таком случае «вес» данного сигнала будет определяться разностью проводимостей мемристоров соответствующих входам с прямым и обратным сигналом. В более сложном случае к мемристорам могут быть параллельно подключены транзисторы, работающие в ключевом режиме, которые при необходимости пропускают электрический ток через прямую или обратную полярность, кроме того, существуют схемы, где в качестве отдельного синапса используется мемристорный мост (рис. 2). Тем не менее, простого дублирования входного сигнала с обратной полярностью будет вполне достаточно для большинства задач. Кроме того, данный способ может позволить варьировать диапазоном «весов» в более широком пределе, по сравнению с «весами», соответствующими проводимости одной структуры.

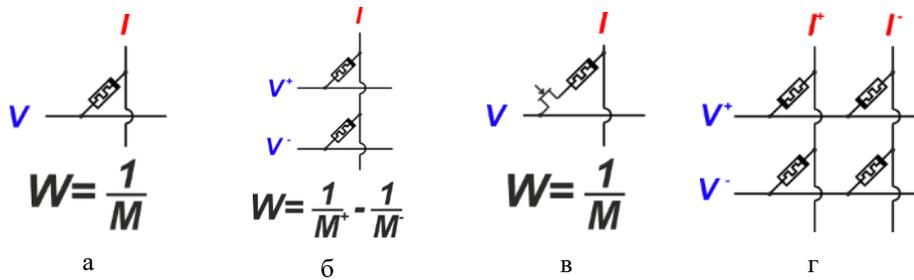
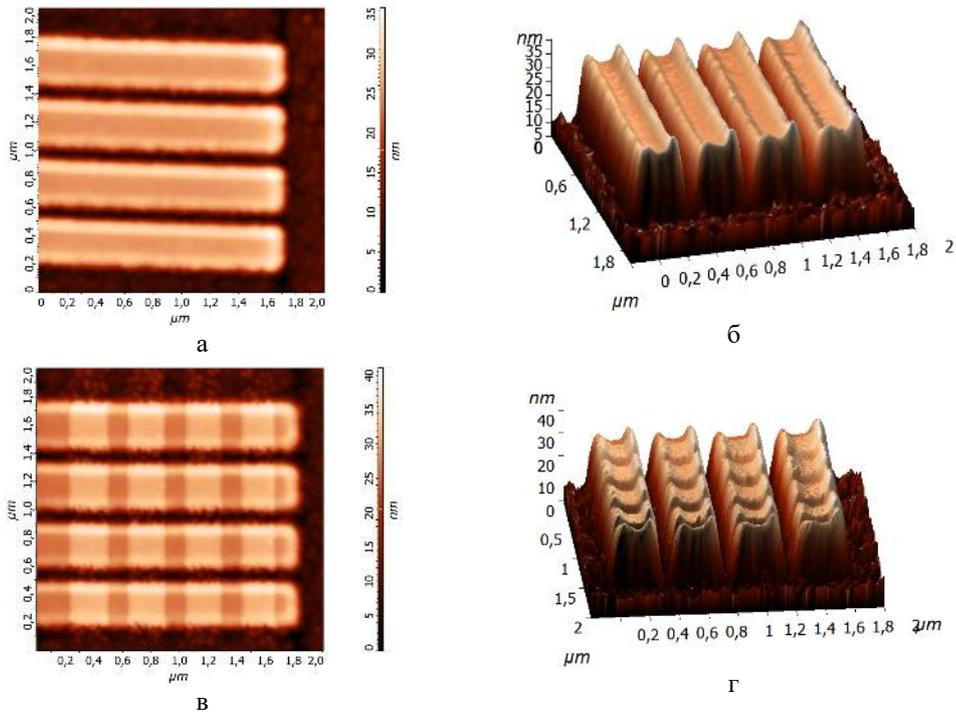


Рис. 2. Схемы реализации искусственных синапсов на основе мемристоров:  
 а – 1М структура с положительными «весами», б – 2М структура с положительными и отрицательными «весами», в – 1Т1М структура с ключом, г – мемристорный мост 4М



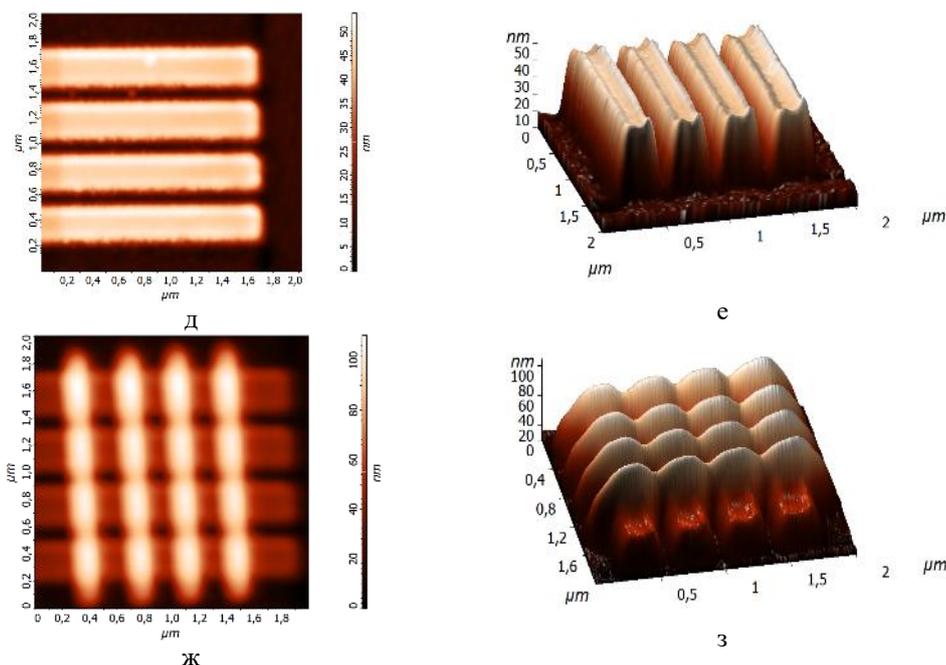


Рис. 3. Этапы изготовления макета однослойной нейронной сети на основе искусственных синапсов: (а) топология и (б) 3D изображение нижних электродов, (в) топология и (г) 3D изображение кроссбар-массива мемристорных наноструктур оксида титана, (д) топография и (е) 3D изображение наноразмерной пленки мемристорного оксида титана, (ж) топология и (з) 3D изображение макета однослойной нейронной сети на основе кроссбар-массива мемристорных наноструктур оксида титана

На основе разработанной топологии был изготовлен макет однослойной нейронной сети на основе искусственных синапсов в виде кроссбар массива мемристоров. В качестве основы служила пленка титана, которая была нанесена на кремниевую подложку с использованием метода магнетронного распыления. Затем методом оптической литографии проводили травление плёнки титана, в результате чего формировались структуры нижних электродов, связанных с контактными площадками, а также контактные площадки для будущих верхних контактных электродов. После этого, было проведено окисление нижних контактных электродов. Окисление проводилось методом локального анодного окисления (ЛАО) в полуконтактном режиме ACM с помощью C3M Solver P47 Pro и кремниевых кантилеверов NSG11 с проводящим платиновым покрытием. В результате окисления на поверхности электродов были сформированы кроссбар-массивы искусственных синапсов как в виде отдельных мемристорных наноструктур, так и в виде сплошной наноразмерной пленки электрохимического оксида титана (рис. 3). На завершающем этапе изготовления макета проводились операции разварки выводов и корпусирования кроссбар-структура (рис. 4).

**Обучение и исследование воспроизводимости макета аппаратной нейронной сети.** Процесс обучения нейронной сети заключается в установлении заданных «весов», при которых сеть будет выдавать результаты, наиболее близкие к требуемым. В случае аппаратной нейронной сети процесс обучения сводится к переключению искусственных синапсов в требуемое состояние. При этом в случае кроссбар-структуры основная сложность заключается в том, чтобы при воздействии импульса переключения на один искусственный синапс исключить воздействие на соседние синапсы за счет возникновения так называемого «тока утечки», которое имеет место быть, особенно при существенной разности в сопротивлении отдельных структур (рис. 5,а).

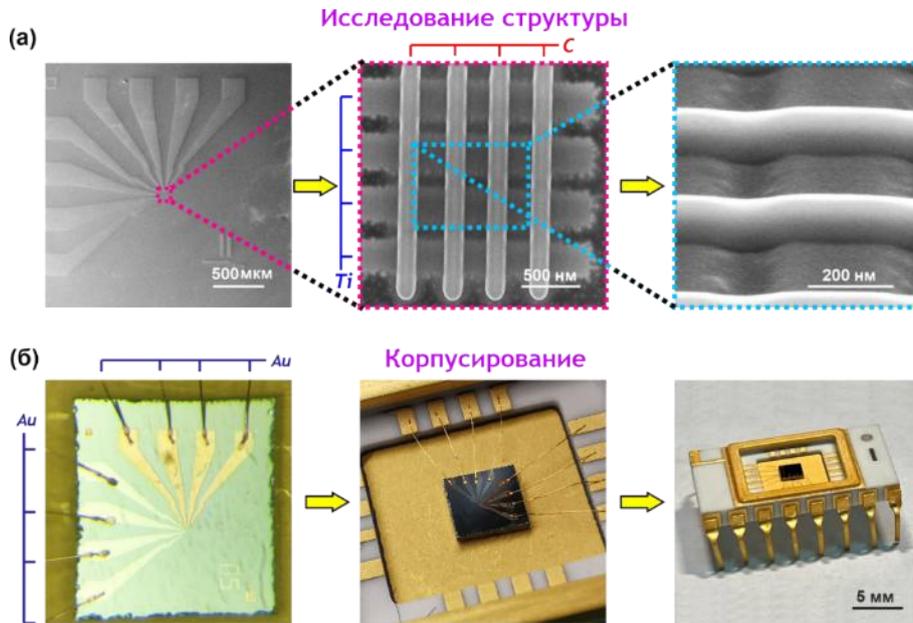


Рис. 4. Результаты изготовления макета однослойной нейронной сети: а – РЭМ-изображения кроссбар-массива с контактными площадками, б – оптические изображения разварки и корпусирования изготовленного макета

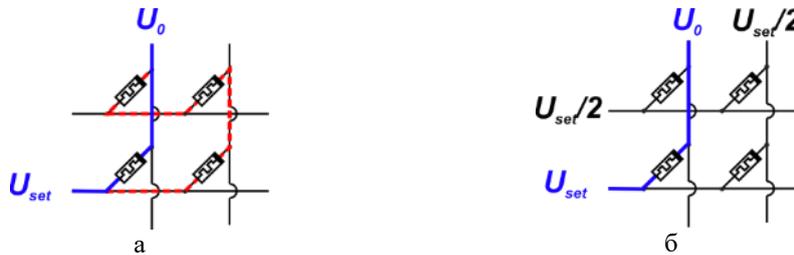


Рис. 5. Метод переключения отдельного искусственного синапса: а – переключение искусственного синапса (синяя линия) и возможные переключения смежных структур (красный пунктир), б – метод защиты от переключений смежных синапсов

Решение данной проблемы может быть найдено в особенностях функционирования искусственных синапсов на основе мемристоров, переключение в которых возникает при превышении пороговой разности потенциалов  $U_{th}$ . Соответственно, одним из способов решения данной проблемы является метод переключения отдельного мемристора путем приложения к соответствующему входу электрического потенциала  $U_{set}$  немного превышающего  $U_{th}$ , и к соответствующему выходу нулевого потенциала. При этом на все остальные входы и выходы будет приложено напряжение  $U_{set}/2$ , которое должно быть меньше  $U_{th}$ . Таким образом, при переключении отдельного мемристора на смежные структуры будет подаваться разность потенциалов, недостаточная для их переключения (рис. 5,б).

Для демонстрации применения аппаратных нейронных сетей для нейросетевой обработки данных с использованием изготовленного кроссбар массива 4x4 мемристоров была поставлена задача классификации входных сигналов. Задача предполагает наличие двух входных сигналов, которые представляют собой либо высокий потенциал (логическая «1») или низкий потенциал (логический «0»). При этом, как было сказано ранее, реализация отрицательных «весов» нейронной сети осуществляется дублированием входящего сигнала с противоположной полярностью. Таким образом макета нейронной сети

будет иметь 3 входа. В качестве выходов макета нейронной сети будут сигналы, детектирующие: 1) первый сигнал выше второго, 2) первый сигнал ниже, 3) оба сигнала высокие. Реализовать реагирование на оба низких сигнала на кроссбар структуре 4x4 не представляется возможным, поскольку на все входы будет подаваться нулевой потенциал. Тем не менее, такую задачу можно реализовать, используя дополнительные два входа с постоянно положительным и постоянно отрицательным сигналами, осуществляющих функцию «сдвига» для нейронных сетей. Таблица истинности входных и выходных сигналов и схема переключения искусственных синапсов представлена на рис. 6.

Для обучения и проведения исследований макет нейронной сети в корпусе устанавливался на макетную плату, подключенную к программно-аппаратному комплексу «Neuro InT», разработанному сотрудниками Научно-исследовательской лаборатории "Нейроэлектроника и мемристоривые наноматериалы", ЮФУ (рис. 7). Для переключения структуры в соответствующее состояние прикладывались импульсы напряжения в соответствии с разработанным алгоритмом.

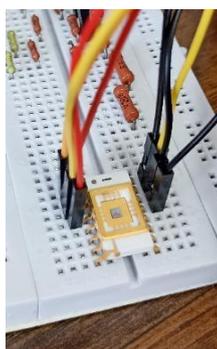
сигнал 1 +	сигнал 1 –	сигнал 2 +	сигнал 2 –	сигнал 1 больше сигнала 2	сигнал 1 меньше сигнала 2	оба сигнала высокие
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	-1	0	1	0
1	-1	0	0	1	0	0
1	-1	1	-1	0	0	1

а

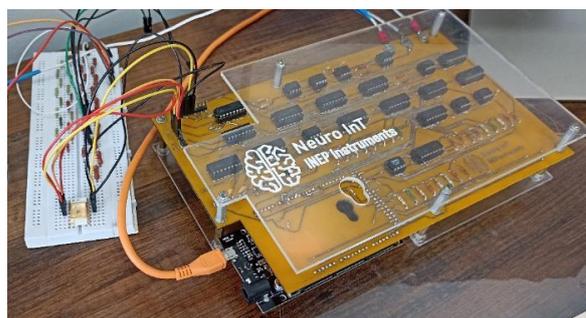
	сигнал 1 больше сигнала 2	сигнал 1 меньше сигнала 2	оба сигнала высокие
сигнал 1 +	LRS	HRS	LRS
сигнал 1 –	HRS	LRS	HRS
сигнал 2 +	HRS	LRS	LRS
сигнал 2 –	LRS	HRS	HRS

б

Рис. 6. Обучение макета нейронной сети: а – таблица истинности входных и выходных сигналов, б – схема переключения искусственных синапсов в кроссбаре



а



б

Рис. 7. Подключение макета нейронной сети: а – макетная плата с установленным макетом нейронной сети, б – подключение макетной платы к программно-аппаратному комплексу «Neuro InT»

Исследование работоспособности макета проводилось с использованием программно-аппаратного комплекса «Neuro InT». На вход структуры подавались прямоугольные импульсы в соответствии с таблицей истинности на рис. 6,а, А на выходе измерялась величина токов (рис. 8). Экспериментальные исследования показали, что при подаче на вход определенных импульсов напряжения на выходе наблюдается максимизация соответствующего тока. Можно заметить, что выход, соответствующий обоим высоким сигналам, имеет всплески, для только одного высокого сигнала. Эту проблему также можно решить введением дополнительных постоянных входов для реализации «сдвига» нейронной сети.

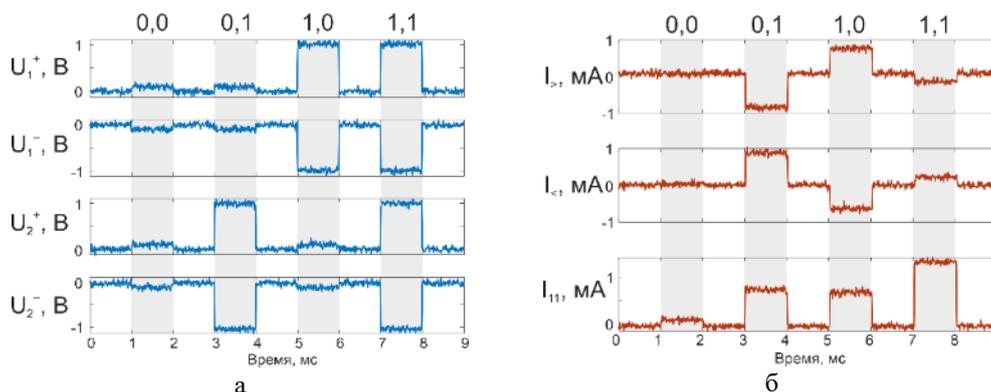


Рис. 8. Исследование работы макета нейронной сети: а – поданные на вход импульсы напряжения, б – токовременные характеристики на выходе нейронной сети

**Заключение.** В работе проведено изготовление, обучение и исследование макета аппаратной нейронной сети, реализованного в виде кроссбар массива искусственных синапсов на основе мемристорных наноструктур электрохимического оксида титана. Был разработан макет полносвязной нейронной сети с учетом различных возможных реализаций искусственных синапсов. На основе разработанной структуры был изготовлен макет полносвязной нейронной сети, для обучения которого был разработан алгоритм переключения отдельных мемристоров. Для демонстрации работы изготовленного макета была предложена задача классификации двух входных сигналов. Исследование макета нейронной сети показало, что все выходы успешно классифицируют входящие сигналы, максимизируя ток через соответствующие выходы для заданных входных значений. Предложенную структуру можно улучшить, добавив дополнительные два входа с постоянным высоким положительным и отрицательным потенциалом для реализации «сдвига» при работе нейронной сети.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке аппаратных нейронных сетей на основе мемристорных структур оксида титана.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10215-П в Южном федеральном университете.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Soori M., Arezoo B., Dastres R. Artificial neural networks in supply chain management, a review // Journal of Economy and Technology. – 2023. – Vol. 1. – P. 179-196.
2. Jaekwang Cha, Shiho Kim CNN Hardware Accelerator Architecture Design for Energy-Efficient AI // Artificial Intelligence and Hardware Accelerators. – 2023. – P. 319-357.
3. Abhijit Pandya, Ankur Agarwal, P. K. Kim Low Power Design of the Neuroprocessor // Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. – 2003. – Vol. 2774. – P. 856-862.
4. Fei Zhang, Mehdi Aghagolzadeh, Karim Oweiss A Fully Implantable, Programmable and Multimodal Neuroprocessor for Wireless, Cortically Controlled Brain-Machine Interface Applications // J Sign Process Syst. – 2012. – Vol. 69. – P. 351-361.

5. Xiaoyang Liu, Zhigang Zeng, Rusheng Ju Design of Memristor-Based Binarized Multi-layer Neural Network with High Robustness // *Neural Information Processing. Communications in Computer and Information Science.* – 2024. – Vol. 1962. – P. 249-259.
6. Mousam Charan Sahu, Anjan Kumar Jena, Sameer Kumar Mallik, Suman Roy, Sandhyarani Sahoo, et al. Reconfigurable Low-Power TiO<sub>2</sub> Memristor for Integration of Artificial Synapse and Nociceptor // *ACS Applied Materials & Interfaces.* – 2023. – Vol. 15 (21). – P. 25713-25725.
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 // *Adv. Electron. Mater.* – 2022. – 2200215.
8. Avilov V.I., Smirnov V.A., Tominov R.V., Sharapov N.A., Avakyan A.A. Atomic force microscopy of titanium oxide nanosize structures resistive switching // *Abstract Book of International Conference “Scanning Probe Microscopy”.* – 2019. – P. 131-132.
9. Avilov V.I., Smirnov V.A., Tominov R.V., Sharapov N.A., Polupanov N.A., Ageev O.A. Phase composition investigation of titanium oxide nanostructures obtained by the local anodic oxidation // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* – 2019. – Vol. 699. – 012003.
10. Смирнов В.А., Авиллов В.И., Томинов Р.В., Федотов А.А., Агеев О.А., Валов И. Мемристорные структуры на основе электрохимического оксида титана для RERAM и нейроморфных применений // *Наноиндустрия.* – 2021. – Т. 14. – С. 664-665.
11. Смирнов В.А., Томинов Р.В., Авиллов В.И., Полякова В.В., Агеев О.А. Исследование эффекта резистивного переключения в не требующих формовки оксидных наноразмерных структурах титана // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2019. – № 2 (204). – С. 201-213.
12. Авиллов В.И., Смирнов В.А., Шарпов Н.А. Размерный эффект в мемристорных наноструктурах на основе оксида титана для создания элементов систем искусственного интеллекта и синаптроники // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2018. – № 2 (196). – С. 34-46.
13. Авиллов В.И. Закономерности формирования и проявления резистивного переключения в наноструктурах оксида титана для аппаратных нейронных сетей // *Перспективные системы и задачи управления: Матер. XIX Всероссийской научно-практической конференции.* – 2024. – С. 419-423.
14. Zhavoronkov L.G., Avilov V.I., Polupanov N.V., Khakhulin D.A., and Smirnov V.A. Fabrication and investigation of a memristive crossbar array artificial synapses based on electrochemical titanium oxide for neuroelectronics // *Ferroelectrics.* – 2024. – Vol. 618 (5). – P. 1323-1329.
15. Хахулин Д.А., Дзюба Д.А., Авиллов В.И., Смирнов В.А. Синаптические свойства мемристора на основе TiO<sub>x</sub> // *Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа: Сб. аннотаций.* – 2023. – 87.
16. Авиллов В.И., Варганов В.И., Федотов А.А., Смирнов В.А. Нейроморфные структуры в системах РТК // *Перспективные системы и задачи управления: Матер. XVIII Всероссийской научно-практической конференции и XIV молодежной школы-семинара.* – 2023. – С. 173-176.
17. Авиллов В.И., Жаворонков Л.Г., Полуванов Н.В., Хахулин Д.А., Смирнов В.А. Синаптические устройства для нейроморфных систем робототехнических комплексов // *Перспективные системы и задачи управления: Матер. XVIII Всероссийской научно-практической конференции и XIV молодежной школы-семинара.* – 2023. – С. 169-173.
18. Томинов Р.В., Авиллов В.И., Черненко Н.Е., Смирнов В.А. Исследование мемристорного эффекта тонкой пленки оксида титана для искусственных нейроподобных систем // *Сб. трудов XIII Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика.* – 2018. – С. 318-319.
19. Karen'kih O.G., Avilov V.I., Smirnov V.A., Fedotov A.A., Sharapov N.A. and Polupanov N.A. Modeling of local anodic oxidation of titanium oxide nanostructures formation process // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* – 2018. – Vol. 443. – 012013.
20. Avilov Vadim I., Tominov Roman V., Vakulov Zakhar E., Zhavoronkov Lev G., and Smirnov Vladimir A. Titanium oxide artificial synaptic device: Nanostructure modeling and synthesis, memristive cross-bar fabrication, and resistive switching investigation // *Nano Research.* – 2023. – Vol. 16. – P. 10222-10233.
21. Avilov Vadim I., Tominov Roman V., Vakulov Zakhar E., Rodriguez Daniel J., Polupanov Nikita V., Smirnov Vladimir A. Nanoscale Titanium Oxide Memristive Structures for Neuromorphic Applications: Atomic Force Anodization Techniques, Modeling, Chemical Composition, and Resistive Switching Properties // *Nanomaterials.* – 2025. – Vol. 15 (1). – 75.
22. Karen'kih O.G., Avilov V.I., Smirnov V.A., Sharapov N.A., Polupanov N.A. Modeling of titanium oxide nanostructures formation process by local anodic oxidation // *Abstract Book of International Conference “Scanning Probe Microscopy”.* – 2018. – 97.

## REFERENCES

1. Soori M., Arezoo B., Dastres R. Artificial neural networks in supply chain management, a review, *Journal of Economy and Technology*, 2023, Vol. 1, pp. 179-196.
2. Jaekwang Cha, Shiho Kim CNN Hardware Accelerator Architecture Design for Energy-Efficient AI, *Artificial Intelligence and Hardware Accelerators*, 2023, pp. 319-357.
3. Abhijit Pandya, Ankur Agarwal, P. K. Kim Low Power Design of the Neuroprocessor, *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, 2003, Vol. 2774, pp. 856-862.
4. Fei Zhang, Mehdi Aghagolzadeh, Karim Oweiss A Fully Implantable, Programmable and Multimodal Neuroprocessor for Wireless, Cortically Controlled Brain-Machine Interface Applications, *J Sign Process Syst.*, 2012, Vol. 69, pp. 351-361.
5. Xiaoyang Liu, Zhigang Zeng, Rusheng Ju Design of Memristor-Based Binarized Multi-layer Neural Network with High Robustness, *Neural Information Processing. Communications in Computer and Information Science*, 2024, Vol. 1962, pp. 249-259.
6. Mousam Charan Sahu, Anjan Kumar Jena, Sameer Kumar Mallik, Suman Roy, Sandhyarani Sahoo, et al. Reconfigurable Low-Power TiO<sub>2</sub> Memristor for Integration of Artificial Synapse and Nociceptor, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, Vol. 15 (21), pp. 25713-25725.
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, *Adv. Electron. Mater.*, 2022, 2200215.
8. Avilov V.I., Smirnov V.A., Tominov R.V., Sharapov N.A., Avakyan A.A. Atomic force microscopy of titanium oxide nanosize structures resistive switching, *Abstract Book of International Conference "Scanning Probe Microscopy"*, 2019, pp. 131-132.
9. Avilov V.I., Smirnov V.A., Tominov R.V., Sharapov N.A., Polupanov N.A., Ageev O.A. Phase composition investigation of titanium oxide nanostructures obtained by the local anodic oxidation, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 699, 012003.
10. Smirnov V.A., Avilov V.I., Tominov R.V., Fedotov A.A., Ageev O.A., Valov I. Memristornye struktury na osnove elektrokhimicheskogo oksida titana dlya RERAM i neyromorfnykh primeneni [Memristor structures based on electrochemical titanium oxide for RERAM and neuromorphic applications], *Nanoindustria* [Nanoindustry], 2021, Vol. 14, pp. 664-665.
11. Smirnov V.A., Tominov R.V., Avilov V.I., Polyakova V.V., Ageev O.A. Issledovanie efekta rezistivnogo pereklyucheniya v ne trebuyushchikh formovki oksidnykh nanorazmernykh strukturakh titana [Study of the effect of resistive switching in oxide nanoscale titanium structures that do not require forming], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 2 (204), pp. 201-213.
12. Avilov V.I., Smirnov V.A., Sharapov N.A. Razmernyy effekt v memristornykh nanostrukturakh na osnove oksida titana dlya sozdaniya elementov sistem iskusstvennogo intellekta i sinaptroniki [Size effect in memristor nanostructures based on titanium oxide for creating elements of artificial intelligence and synaptronics systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 2 (196), pp. 34-46.
13. Avilov V.I. Zakonomernosti formirovaniya i proyavleniya rezistivnogo pereklyucheniya v nanostrukturakh oksida titana dlya apparatnykh neyronnykh setey [Patterns of formation and manifestation of resistive switching in titanium oxide nanostructures for hardware neural networks], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XIX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Advanced control systems and problems: Proceedings of the XIX All-Russian scientific and practical conference], 2024, pp. 419-423.
14. Zhavoronkov L.G., Avilov V.I., Polupanov N.V., Khakhulin D.A., and Smirnov V.A. Fabrication and investigation of a memristive crossbar array artificial synapses based on electrochemical titanium oxide for neuroelectronics, *Ferroelectrics*, 2024, Vol. 618 (5), pp. 1323-1329.
15. Khakhulin D.A., Dzyuba D.A., Avilov V.I., Smirnov V.A. Sinaphticheskie svoystva memristora na osnove TiO<sub>x</sub> [Synaptic properties of a TiO<sub>x</sub>-based memristor], *Kurchatovskaya mezhdistsiplinarnaya molodezhnaya nauchnaya shkola: Sb. annotatsiy* [Kurchatov Interdisciplinary Youth Scientific School: Collection of Abstracts], 2023, 87.
16. Avilov V.I., Varganov V.I., Fedotov A.A., Smirnov V.A. Neyromorfnye struktury v sistemakh RTK [Neuromorphic structures in RTC systems], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIV molodezhnoy shkoly-seminara* [Advanced systems and control problems: Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference and XIV Youth School-Seminar], 2023, pp. 173-176.

17. Avilov V.I., Zhavoronkov L.G., Polupanov N.V., Khakhulin D.A., Smirnov V.A. Sinapticheskie ustroystva dlya neyromorfnykh sistem robototekhnicheskikh kompleksov [Synaptic devices for neuromorphic systems of robotic complexes], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIV molodezhnoy shkoly-seminara* [Prospective systems and control problems: Proceedings of the XVIII All-Russian scientific and practical conference and XIV youth school-seminar], 2023, pp. 169-173.
18. Tominov R.V., Avilov V.I., Chernenko N.E., Smirnov V.A. Issledovanie memristornogo efekta tonkoy plenki oksida titana dlya iskusstvennykh neyropodobnykh sistem [Study of the memristor effect of a thin titanium oxide film for artificial neuron-like systems], *Sb. trudov XIII Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh «Nanoelektronika, nanofotonika i nelineynaya fizika* [Collection of works of the XIII All-Russian conference of young scientists "Nanoelectronics, nanophotonics and nonlinear physics"], 2018, pp. 318-319.
19. Karen'kih O.G., Avilov V.I., Smirnov V.A., Fedotov A.A., Sharapov N.A. and Polupanov N.A. Modeling of local anodic oxidation of titanium oxide nanostructures formation process. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 443, 012013.
20. Avilov Vadim I., Tominov Roman V., Vakulov Zakhar E., Zhavoronkov Lev G., and Smirnov Vladimir A. Titanium oxide artificial synaptic device: Nanostructure modeling and synthesis, memristive crossbar fabrication, and resistive switching investigation, *Nano Research*, 2023, Vol. 16, pp. 10222-10233.
21. Avilov Vadim I., Tominov Roman V., Vakulov Zakhar E., Rodriguez Daniel J., Polupanov Nikita V., Smirnov Vladimir A. Nanoscale Titanium Oxide Memristive Structures for Neuromorphic Applications: Atomic Force Anodization Techniques, Modeling, Chemical Composition, and Resistive Switching Properties, *Nanomaterials*, 2025, Vol. 15 (1), 75.
22. Karen'kih O.G., Avilov V.I., Smirnov V.A., Sharapov N.A., Polupanov N.A. Modeling of titanium oxide nanostructures formation process by local anodic oxidation, *Abstract Book of International Conference "Scanning Probe Microscopy"*, 2018, 97.

**Авилов Вадим Игоревич** – Южный федеральный университет; e-mail: avilovvi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; к.т.н.; доцент.

**Душина Людмила Андреевна** – Южный федеральный университет; e-mail: ldushina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; студент.

**Полупанов Никита Валерьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: npolupanov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; студент.

**Смирнов Владимир Александрович** – Южный федеральный университет; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; к.т.н.; зав. кафедрой РТЭН.

**Avilov Vadim Igorevich** – Southern Federal University; e-mail: avilovvi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Dushina Ludmila Andreevna** – Southern Federal University; e-mail: ldushina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; student.

**Polupanov Nikita Valerievich** – Southern Federal University; e-mail: npolupanov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; student.

**Smirnov Vladimir Aleksandrovich** – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.; head of the department.

УДК 004.3, 004.9

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-214-229

**Э.В. Мельник, Д.Е. Блох, А.И. Безмельцев, В.С. Панищев, С.Н. Полторацкий**  
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЕЙ НЕЙРОСЕТЕЙ MLP И CNN НА ПЛИС**  
**ДЛЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*Актуальность.* Развитие методов машинного обучения и архитектур нейронных сетей, а также их распространение в различные сферы промышленности обуславливают актуальность решения задач по их аппаратной реализации. Использование программируемых логических интегральных схем в этой области позволит повысить скорость обработки данных и адаптивность реализуемых алгоритмов. Однако проектирование нейросетевых архитектур на программируе-