

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623346>

Новые нейроморфные архитектуры на базе кроссбар-массивов нанокompозитных мемристоров $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$

А.В. Емельянов^{1*}, А.Н. Мацукатова^{1,2}, А.И. Ильясов^{1,2}, В.А. Демин¹, В.В. Рыльков¹¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация;² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Нейроморфные вычислительные системы (НВС) на основе мемристоров представляют скоростной и энергоэффективный подход к обучению нейронных сетей и решению когнитивных задач (распознавание образов, обработка больших данных, предсказание и т.д.) [1]. Мемристоры могут быть реализованы в геометрии больших кроссбар-массивов для выполнения операции векторно-матричного умножения (ВМУ) за один шаг путём взвешенного суммирования электрических токов (согласно законам Ома и Кирхгоффа) [1]. В свою очередь, являясь самой массовой параллельной операцией в обучении и выводе нейронных сетей, ВМУ чрезвычайно затратна по времени и энергии в традиционных архитектурах фон Неймана. В связи с этим отличия НВС на основе мемристоров представляют большой интерес. Мемристоры уже успешно реализованы для различных реализаций НВС, продемонстрированы такие схемы, как многослойный персептрон (MLP) [2], долговременная кратковременная память и другие. Большинство этих НВС обычно обучаются с помощью различных типов алгоритмов обучения градиентного спуска, аппаратная реализация которых сложна из-за ненадёжных вариаций мемристивных устройств от цикла к циклу (с2с) и от устройства к устройству (d2d). Было предложено несколько подходов для частичного смягчения этих проблем, в том числе резервуарные вычисления [3] и инженерия точных признаков [4]. Общая идея таких подходов заключается в уменьшении количества необходимых весов (т.е. мемристоров) по сравнению с полностью связанными нейронными сетями. В этом отношении большой интерес представляют такие новые архитектуры, как свёрточная нейронная сеть (СНС) и MLP-миксер, поскольку они обеспечивают значительное снижение веса без уменьшения эффективности классификации. Хотя СНС на основе мемристоров уже была продемонстрирована, различные аспекты её реализации (такие как совместное проектирование гибридного аппаратного и программного обеспечения) ещё предстоит изучить. MLP-миксер был реализован только программно. Поэтому в данной работе мы изучили возможность аппаратной реализации СНС и MLP-миксера на основе кроссбар-массивов мемристоров. С этой целью были изучены мемристоры на основе нанокompозита $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ (CFB-LNO НК), работающие по механизму мультифилamentного резистивного переключения. Они демонстрируют высокую выносливость, длительную стабильность и обладают многоуровневым резистивным переключением [5].

Массив мемристоров был изготовлен с использованием лазерной фотолитографии для формирования рисунка электродных шин и ионно-лучевого напыления на оригинальной установке для нанесения активного слоя (LiNbO_3 толщиной ~10 нм и НК CFB-LNO толщиной ~290 нм с $x \approx 10-25$ ат.%). Подробности процесса изготовления можно найти в работе [5].

Вольт-амперные характеристики изготовленных мемристоров показали небольшие вариации с2с и d2d, пластичность с 16 различными резистивными состояниями и выносливость более 10^5 циклов. Используя кроссбар-массивы на основе нанокompозитов, мы реализовали гибридную СНС, состоящую из аппаратного экстрактора признаков с одним/двумя ядрами и программного классификатора. Кроме того, мы продемонстрировали в модели, что использование исследуемых мемристоров в адаптированной архитектуре MLP-миксера приводит к высокой точности классификации, устойчивой к мемристивным вариациям и зависшим устройствам.

Ключевые слова: мемристор; кроссбар-массив; искусственный синапс; нейроморфные вычисления; свёрточные нейронные сети; МП-миксер.

Как цитировать:

Емельянов А.В., Мацукатова А.Н., Ильясов А.И., Демин В.А., Рыльков В.В. Новые нейроморфные архитектуры на базе кроссбар-массивов нанокompозитных мемристоров $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 798–801. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623346>

Рукопись получена: 15.03.2023

Рукопись одобрена: 26.11.2023

Опубликована online: 20.01.2024

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-19-00171). Измерения проводились на оборудовании ресурсных центров (НИЦ «Курчатовский институт»). Авторы благодарят Ю.В. Грищенко, К.Ю. Черноглазова и проф. А.В. Ситникова за изготовление образцов.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xia Q., Yang J.J. Memristive crossbar arrays for brain-inspired computing // *Nat Mater.* 2019. Vol. 18, N 4. P. 309–323. Corrected and republished from: *Nat Mater.* 2019. Vol. 18, 5. P. 518. doi: 10.1038/s41563-019-0291-x
2. Shchanikov S., Zuev A., Bordanov I., et al. Designing a bidirectional, adaptive neural interface incorporating machine learning capabilities and memristor-enhanced hardware // *Chaos, Solitons and Fractals.* 2021. Vol. 142. P. 110504. doi: 10.1016/j.chaos.2020.110504
3. Matsukatova A.N., Prudnikov N.V., Kulagin V.A., et al. Combination of organic-based reservoir computing and spiking neuromorphic systems for a robust and efficient pattern classification // *Adv Intell Syst.* 2023. Vol. 5, N 6. P. 2200407. doi: 10.1002/aisy.202200407
4. Matsukatova A.N., Vdovichenko A.Yu., Patsaev T.D., et al. Scalable nanocomposite parylene-based memristors: multifilamentary resistive switching and neuromorphic applications // *Nano Res.* 2023. Vol. 16. P. 3207–3214. doi: 10.1007/s12274-022-5027-6
5. Ilyasov A.I., Nikiruy K.E., Emelyanov A.V., et al. Arrays of nanocomposite crossbar memristors for the implementation of formal and spiking neuromorphic systems // *Nanotechnol Russia.* 2022. Vol. 17. P. 118–125. doi: 10.1134/S2635167622010050

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

* А.В. Емельянов; адрес: Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1; e-mail: emelyanov.andrey@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623346>

Novel neuromorphic architectures based on crossbar arrays of $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ nanocomposite memristors

A.V. Emelyanov^{1*}, A.N. Matsukatova^{1,2}, A.I. Iliasov^{1,2}, V.A. Demin¹, V.V. Rylkov¹¹ National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation;² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Memristor-based neuromorphic computing systems (NCSs) offer a fast, highly computationally efficient, and energy efficient approach to neural network (NN) training and solving cognitive problems, such as pattern recognition, big data processing, and prediction [1]. Memristors can be organized in large crossbar arrays to perform vector-matrix multiplication (VMM) in a natural one-step manner by the weighted electrical current summation, following Ohm's and Kirchhoff's laws [1]. In contrast, while VMM is the most massively parallel operation in NN learning and inference, it is extremely time- and energy-expensive in traditional von Neumann architectures. Therefore, memristor-based NCSs are highly desirable. Memristors have already been successfully used for various NCS realizations, including multi-layer perceptron (MLP) [2], long short-term memory, and others. Most NCSs are trained using gradient descent algorithms, but hardware implementation is challenging due to the inconsistent cycle-to-cycle (c2c) and device-to-device (d2d) variations of memristive devices. Several methods have been suggested to alleviate these issues, such as reservoir computing [3] and fine feature engineering [4]. The main concept behind these techniques is to minimize the number of necessary weights (i.e., memristors) in comparison to fully connected NNs. In this regard, convolutional NN (CNN) and MLP-mixer are novel architectures that are immensely intriguing due to their significant weight reduction without compromising classification efficiency. While CNNs based on memristors have already been demonstrated, further investigation of its implementation, such as hybrid hardware-software co-design, remains necessary due to its unrealized aspects. In contrast, only software-based implementation of MLP-mixer has been achieved. Hence, this study explores the potential of crossbar arrays of memristors for the hardware implementation of CNN and MLP-mixer networks. We examined CFB-LNO NC memristors composed of $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$, which exhibit high endurance, long retention, and multilevel RS through a multifilamentary RS mechanism [5].

A crossbar array of memristors was manufactured by utilizing laser photolithography for the patterning of electrode buses, and ion-beam sputtering at the original facility for deposition of the active layer, which was composed of LiNbO₃ (~10 nm thick) and CFB-LNO NC (~290 nm thick) with $x \approx 10$ –25 at.%. For more information about the fabrication process, please refer to [5]. The I-V curves of the fabricated memristors indicated negligible c2c and d2d variations, along with 16 distinct resistive states and endurance exceeding 105 cycles. A hybrid CNN was developed using crossbar arrays composed of nanocomposites. The hardware component of this system incorporated a feature extractor with one or two kernels, while the software utilized a classifier. Additionally, we demonstrated through simulations that implementing the studied memristors in the precisely tailored MLP-Mixer framework yields exceptional classification accuracy, impervious to memristive fluctuations and stuck hardware.

Keywords: memristor; crossbar array; artificial synapse; neuromorphic computing; convolutional neural networks; MLP-mixer.

To cite this article:

Emelyanov AV, Matsukatova AN, Iliasov AI, Demin VA, Rylkov VV. Novel neuromorphic architectures based on crossbar arrays of $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ nanocomposite memristors. *Genes & cells*. 2023;18(4):798–801. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623346>

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Received: 15.03.2023**Accepted:** 26.11.2023**Published online:** 20.01.2024

Funding sources. This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00171). Measurements were carried out with the equipment of the Resource Centers (NRC “Kurchatov Institute”). Authors are thankful to Yu.V. Grishchenko, K.Yu. Chernoglazov, and Prof. A.V. Sitnikov for the sample fabrication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

REFERENCES

1. Xia Q, Yang JJ. Memristive crossbar arrays for brain-inspired computing. *Nat Mater.* 2019;18(4):309–323. Corrected and republished from: *Nat Mater.* 2019;18(5):518. doi: 10.1038/s41563-019-0291-x
2. Shchanikov S, Zuev A, Bordanov I, et al. Designing a bidirectional, adaptive neural interface incorporating machine learning capabilities and memristor-enhanced hardware. *Chaos, Solitons and Fractals.* 2021;142:110504. doi: 10.1016/j.chaos.2020.110504
3. Matsukatova AN, Prudnikov NV, Kulagin VA, et al. Combination of organic-based reservoir computing and spiking neuromorphic systems for a robust and efficient pattern classification. *Adv Intell Syst.* 2023. Vol. 5, N 6. P. 2200407. doi: 10.1002/aisy.202200407
4. Matsukatova AN, Vdovichenko AYu, Patsaev TD, et al. Scalable nanocomposite parylene-based memristors: multifilamentary resistive switching and neuromorphic applications. *Nano Res.* 2023;16:3207–3214. doi: 10.1007/s12274-022-5027-6
5. Ilyasov AI, Nikiruy KE, Emelyanov AV, et al. Arrays of nanocomposite crossbar memristors for the implementation of formal and spiking neuromorphic systems. *Nanotechnol Russia.* 2022;17:118–125. doi: 10.1134/S2635167622010050

AUTHORS' CONTACT INFO

* A.V. Emelyanov; address: 1 Akademika Kurchatova square, 123182 Moscow, Russian Federation; e-mail: emelyanov.andrey@mail.ru