

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623423>

Резервуарная вычислительная система с волатильными и неволатильными органическими мемристорами — перспективная аппаратная архитектура

А.Н. Мацукатова^{1, 2*}, Н.В. Прудников^{1, 3}, В.А. Кулагин^{1, 2}, А.Д. Трофимов^{1, 3}, А.В. Емельянов^{1, 3}¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация;² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация;³ Московский физико-технический институт, Московская область, Долгопрудный, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В последние годы многие научные группы работают над аппаратной реализацией искусственных нейронных сетей, чтобы приблизиться к вычислительной эффективности нервных систем живых организмов. Мемристоры могут играть роль синапсов в таких сетях [1]. Разнообразные мемристоривые структуры и материалы уже были протестированы в нейронных сетях с различными архитектурами, но до сих пор ни один мемристор не считается идеальным для аппаратной реализации синапса [1]. Одной из наиболее существенных проблем является наличие вариативности, присущей всем мемристоривым устройствам, что усложняет обучение нейронных сетей [1]. Было предложено несколько подходов для частичного решения этой проблемы, например создание резервуарных вычислительных систем (РВС) [2] и спайковых нейронных сетей (СНС) [3], а также инженерия дефектов для улучшения мемристоривых характеристик. В этой работе мы предлагаем объединить РВС с СНС и создать нейроморфную биоподобную систему на основе двух типов органических мемристоров со специально разработанными структурами и улучшенными характеристиками.

Резервуарная вычислительная система состоит из двух основных частей: резервуара и считывающего слоя [2]. Резервуарный слой извлекает некоторые характерные признаки из входных данных благодаря своей внутренней нелинейной динамике. Затем считывающий слой использует эти признаки для классификации входных данных. Как правило, в качестве считывающего слоя в РВС используют стандартную полносвязную нейронную сеть. Процесс обучения происходит только в считывающем слое, в то время как резервуар не обучается. Уменьшение количества обучаемых синапсов значительно снижает влияние мемристоривой вариативности на процесс обучения.

Использование различных типов мемристоров в РВС принципиально. Резервуарный слой должен состоять из мемристоров с кратковременной памятью, т.е. волатильных мемристоров. Таким образом, мемристоры могут обрабатывать каждый образец из входных данных индивидуально. Для реализации этого слоя были выбраны волатильные мемристоры на основе полианилина (ПАНИ). Они могут работать с биологически правдоподобными временными диапазонами, что важно, поскольку мы стремимся имитировать биологические системы [4]. Напротив, считывающий слой должен состоять из мемристоров с долговременной памятью, т.е. неволатильных мемристоров, поскольку он должен сохранять обученные синаптические веса. Для считывающего слоя были выбраны неволатильные полип-ксилиленовые (ППК) мемристоры с внедрёнными наночастицами MoO₃.

Резервуарная вычислительная система использует важные принципы функционирования мозга, поскольку и кратковременная, и долговременная память играют важную роль в биологических системах. Однако обычно в качестве считывающего слоя в РВС используют стандартные нейронные сети [2]. Их обучение требует постоянного глобального обновления весов, что делает эти сети уязвимыми к мемристоривой стохастичности. С другой стороны, в СНС предусмотрено локальное обучение, например с использованием биоподобных правил обучения, что делает такие сети более эффективными и надёжными [3]. Поэтому мы предполагаем, что полностью органическая РВС с СНС-считывающим слоем является многообещающей аппаратной мемристоривой архитектурой.

Работа состоит из двух частей: аппаратной и программной. Сначала были изготовлены и исследованы мемристоривые устройства на основе ПАНИ и ППК. Аппаратный ПАНИ-резервуар продемонстрировал способность извлекать характерные признаки из входных данных. Нанокompозитные ППК-мемристоры оказались подходящими на роль синапсов в считывающем слое благодаря уникальному сочетанию высокой скорости переключения, высокой стабильности, низкого энергопотребления и возможности реализации в кроссбар-архитектуре. Затем в ходе моделирования было проведено сравнение стандартного и спайкового считывающего слоя. Показано, что СНС-считывающий слой более адаптивен и устойчив к шуму в задачах классификации изображений, а также к мемристоривой вариативности [5].

Рукопись получена: 04.05.2023

Рукопись одобрена: 26.11.2023

Опубликована online: 20.01.2024

Ключевые слова: органические мемристоры; резервуарные вычисления; спайковые нейронные сети; аппаратные нейронные сети.

Как цитировать:

Мацукатова А.Н., Прудников Н.В., Кулагин В.А., Трофимов А.Д., Емельянов А.В. Резервуарная вычислительная система с волатильными и неволатильными органическими мемристорами — перспективная аппаратная архитектура // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 814–817. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623423>

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. Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-57-7801). А.Н. Мацукатова является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (№ 19-2-6-57-1). Измерения выполнены с использованием оборудования ресурсных центров (НИЦ «Курчатовский институт»).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Y., Wang Z., Zhu J., et al. Brain-inspired computing with memristors: challenges in devices, circuits, and systems // *Appl Phys Rev*. 2020. Vol. 7, N 1. P. 011308. doi: 10.1063/1.5124027
2. Milano G., Pedretti G., Montano K., et al. In materia reservoir computing with a fully memristive architecture based on self-organizing nanowire networks // *Nat Mater*. 2022. Vol. 21, N 2. P. 195–202. doi: 10.1038/s41563-021-01099-9
3. Querlioz D., Bichler O., Dollfus P., et al. Immunity to device variations in a spiking neural network with memristive nanodevices // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2013. Vol. 12, N 3. P. 288–295. doi: 10.1109/TNANO.2013.2250995
4. Maseev D.N., Suleimanova A.A., Prudnikov N.V., et al. Memristive circuit-based model of central pattern generator to reproduce spinal neuronal activity in walking pattern // *Front Neurosci*. 2023. Vol. 17. P. 1124950. doi: 10.3389/fnins.2023.1124950
5. 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 // *Advanced Intelligent Systems*. 2023. Vol. 5, N 6. P. 2200407. doi: 10.1002/aisy.202200407

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

* А.Н. Мацукатова; адрес: Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1;
e-mail: an.matcukatova@physics.msu.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623423>

A reservoir computing system with volatile and non-volatile organic memristors as a promising hardware architecture

A.N. Matsukatova^{1, 2 *}, N.V. Prudnikov^{1, 3}, V.A. Kulagin^{1, 2}, A.D. Trofimov^{1, 3}, A.V. Emelyanov^{1, 3}¹ National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation;² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation;³ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, Russian Federation

ABSTRACT

In recent years, several scientific teams have been focusing on the hardware implementation of artificial neural networks to match their biological counterparts in computational efficiency. Memristors could potentially serve as synapses in these networks [1]. While various memristive structures and materials have already undergone testing in different neural network architectures, currently no memristor is deemed ideal for hardware synapse implementation [1]. One of the major obstacles that is encountered in the training of neural networks on memristive devices is the inherent stochasticity that characterizes these devices [1]. There have been several proposed approaches to deal with this issue, including the use of a reservoir computing system (RCS) [2], spiking neural networks (SNN) [3], and defect engineering to improve memristive characteristics. In this project, we aim to merge RCS and SNN to produce a biologically-inspired neuromorphic system using two variations of organic memristors featuring specifically engineered structures and advanced properties.

The RCS comprises the reservoir and readout components [2]. The reservoir layer extracts significant features from the input data using its internal nonlinear dynamics. The readout layer leverages these features to classify the input data using a conventional fully connected neural network in the RCS. Only the readout layer undergoes the training process, as the reservoir is not trainable. This decrease in number of trainable parameters significantly minimizes the effect of memristive stochasticity on the training process.

The use of various memristor types for RCS is vital. The reservoir layer ought to comprise memristors with short-term memory, specifically, volatile memristors, to process each input sample independently. The implementation of polyaniline-based volatile memristors was chosen for this layer, operating within a biologically plausible time frame, reflecting our aim of mimicking biological systems [4]. Instead, the reservoir layer should be made up of memristors with long-term memory, specifically non-volatile memristors, as the readout layer needs to maintain the trained synaptic weights. Therefore, non-volatile parylene memristors with MoO₃ nanoparticles were selected for the readout layer.

The reservoir computing system incorporates fundamental brain function principles, recognizing the importance of both short and long-term memory in biological systems. Despite this, conventional neural networks consistently serve as a readout layer in RCSs [2]. Global weight updates in their training make them vulnerable to memristive stochasticity, while SNNs allow for local training by means of bio-inspired learning rules, which makes them more effective and robust [3]. Therefore, a fully organic RCS with an SNN readout layer is assumed to be a promising hardware memristive architecture.

The work comprises two parts: hardware and software. Initially, polyaniline- and parylene-based memristive devices were manufactured and assessed. The hardware polyaniline reservoir displayed the capability of extracting characteristic features from input data. The nanocomposite parylene memristors were appropriate for the role of synapses in the readout layer because of their unique combination of high switching speed, high stability, low power consumption, and possibility of crossbar implementation. Next, we compared the traditional and spiking readout layers through simulation, and found that the SNN readout layer is more adaptive and can sustain noise in image classification tasks as well as memristive stochasticity [5].

Keywords: organic memristors; reservoir computing; spiking neural networks; hardware neural networks.

To cite this article:

Matsukatova AN, Prudnikov NV, Kulagin VA, Trofimov AD, Emelyanov AV. A reservoir computing system with volatile and non-volatile organic memristors as a promising hardware architecture. *Genes & cells*. 2023;18(4):814–817. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623423>

Received: 04.05.2023

Accepted: 26.11.2023

Published online: 20.01.2024

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.

Funding sources. This work was supported by the RFBR (project No. 20-57-7801). A.N. Matsukatova is a scholar of the Foundation for the Advancement of Theoretical Physics and Mathematics "BASIS" (No. 19-2-6-57-1). Measurements were carried out with the equipment of the Resource Centers (NRC "Kurchatov Institute").

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

REFERENCES

1. Zhang Y, Wang Z, Zhu J, et al. Brain-inspired computing with memristors: challenges in devices, circuits, and systems. *Appl Phys Rev.* 2020;7(1):011308. doi: 10.1063/1.5124027
2. Milano G, Pedretti G, Montano K, et al. In materia reservoir computing with a fully memristive architecture based on self-organizing nanowire networks. *Nat Mater.* 2022;21(2):195–202. doi: 10.1038/s41563-021-01099-9
3. Querlioz D, Bichler O, Dollfus P, et al. Immunity to device variations in a spiking neural network with memristive nanodevices. *IEEE Transactions on Nanotechnology.* 2013;12(3):288–295. doi: 10.1109/TNANO.2013.2250995
4. Mashaev DN, Suleimanova AA, Prudnikov NV, et al. Memristive circuit-based model of central pattern generator to reproduce spinal neuronal activity in walking pattern. *Front Neurosci.* 2023;17:1124950. doi: 10.3389/fnins.2023.1124950
5. 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. *Advanced Intelligent Systems.* 2023;5(6):2200407. doi: 10.1002/aisy.202200407

AUTHORS' CONTACT INFO

* A.N. Matsukatova; address: 1 Akademika Kurchatova square, 123182 Moscow, Russian Federation; e-mail: an.matsukatova@physics.msu.ru