

Труды XXVII научной конференции по радиофизике

**СЕКЦИЯ
«СТОХАСТИЧЕСКИЕ МУЛЬТИСТАБИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»**

Сопредседатели – Б. Спаньоло (Италия), А.А. Дубков, секретарь – А.А. Харчева.
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ МЕМРИСТОРА С ДРУГИМИ ДИСКРЕТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

А.Е. Китаев¹⁾, А.И. Белов²⁾, Д.В. Гусейнов²⁾, А.Н. Михайлов²⁾

¹⁾ АО «ННПО имени М.В. Фрунзе»

²⁾ ННГУ имени Н.И. Лобачевского

Введение

Мемристор – дискретный радиотехнический элемент, теоретически предсказанный в семидесятые годы 20-го века ([1],[2]) и реализованный на практике уже 21-м веке (в 2008 году) в форме устройства с резистивным переключением [3]. Возможности интеграции мемристивных устройств с КМОП-схемами делают актуальным изучение электрических цепей, в составе которых мемристоры соединены с обычными дискретными элементами.

Доклад сделан по материалам статьи [4] (и ее переводного варианта [5]). В этих работах исследованы уравнения, описывающие участки радиотехнических цепей, в состав которых входят мемристоры, последовательно соединенные с традиционными дискретными элементами: резистором, полупроводниковым диодом, индуктивностью и емкостью. При этом рассмотрены мемристоры, управляемые напряжением и подчиняющиеся уравнениям модели с переключением порогового типа.

Методика решения задачи

Получили известность следующие общие уравнения [2] для мемристивных систем, управляемых напряжением:

$$I(t) = \frac{V(t)}{R(x, V)}, \quad \frac{dx}{dt} = f(x, V). \quad (1)$$

Здесь I – ток, проходящий через мемристор, V – напряжение, приложенное к мемристор, x – внутренний параметр. В нашем случае внутренний параметр x – это отношение длины части прибора, обладающей повышенной проводимостью, к полной длине прибора.

В качестве возможной функции состояния f в статье [6] приведена следующая функция, описываемая разными выражениями при различных значениях аргумента (кусочно-заданная):

$$f(x, V) = \begin{cases} \alpha(V - V_{t+})(1 - x), & V > V_{t+}, \\ \beta(V - V_{t-})x, & V < V_{t-}, \\ 0, & V_{t-} < V < V_{t+}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь α, β – скорости переключения, V_{t+} и V_{t-} – пороги переключения (предполагается, что первый порог имеет положительное значение, а второй – отрицательное). В докладе исследуется поведение электрических цепей с мемристором в том случае, когда аналогичные пороги переключения «сглажены» (при этом функция состояния представляется единой формулой):

$$f(x, V) = P_1 (V - V_{t+})\alpha(V - V_{t+})(1 - x) + \quad (3)$$

$$+P_1(-(V - V_{t-}))\beta(V - V_{t-})x.$$

Здесь $P_1(V)$ – пороговая функция, которая выражается через функцию ошибок:

$$P_1(V) = 0.5 \operatorname{erf}(v_1 V) + 0.5. \quad (4)$$

Параметр v_1 определяет быстроту спада пороговой функции.

Вначале исследуется самый простой случай – когда управляющее напряжение приложено непосредственно к мемристору (это заданное внешнее напряжение V является последовательностью треугольных импульсов). При этом решается система уравнений (1). Функция f задается формулами (3) и (4), а R выражается следующей формулой:

$$R = R_{off} + (R_{on} - R_{off})x. \quad (5)$$

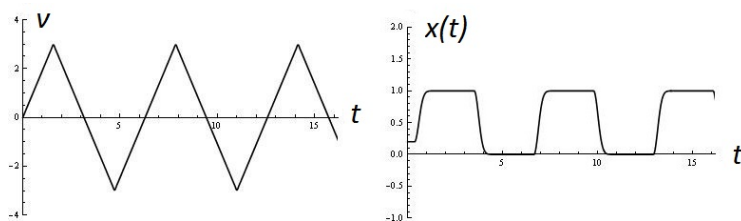


Рис. 1

Графики заданного напряжения и результата численного расчета для параметра x изображены на рисунке 1.

Следующий исследованный вариант – последовательное соединение мемристора и резистора с сопротивлением R . Решается система из трех уравнений:

$$I = \frac{V(t)}{R + R_M}, \quad R_M = R_M(x), \quad \frac{dx}{dt} = f(x, IR_M). \quad (6)$$

Во втором уравнении R_M выражается через x так же, как и R в формуле (5).

Для данной комбинации (мемристорм-резистор) было проведено сравнение результатов численного расчета с экспериментом. При этом использовались данные, полученные в Нижегородском университете им. Лобачевского Михайловым, Гусейновым и Беловым. Эксперимент проводился с мемристивным устройством в интегральном исполнении – со структурой «металл-оксид-металл». Использовалась мемристивная структура Au (20 нм) / ZrO₂ (Y) (20 нм) / Ta (20 нм) / Pt (50 нм), сформированная на окисленной подложке кремния. Пленка ZrO₂(Y) наносилась при температуре 300 °С методом ВЧ-магнетронного распыления мишени из смеси порошков ZrO₂ (88 мол. %) и Y₂O₃ (12 мол. %). Металлические электроды наносились методом магнетронного распыления на постоянном токе при температуре 200°С. Площадь мемристивного устройства составила 20 × 20 мкм.

При расчете принималось, что на участок цепи с мемристормом и резистормом, которые соединены последовательно, подается напряжение, соответствующее данным рисунка 1, сдвинутому влево на полпериода и смещенным на 0.15 В (амплитуда данного

пилообразного напряжения составляла 1.15 В, таким образом внешнее напряжение изменялось от -1 В до 1.3 В, период равен 18 сек). Для соответствия полярности переключения той, что была реализована в эксперименте при заземлении верхнего электрода мемристивной структуры, полярность напряжения в модели также была изменена на противоположную.

Параметры в уравнениях были выбраны следующие: $\alpha = 173.95$, $\beta = 0.7$ (скорости переключения), $V_{i-} = -0.48$, $V_{i+} = 0.57$ (пороги переключения), $v_1 = 30$ (параметр крутизны пороговой функции P_1), $R_{on} = 1400$ Ом, $R_{off} = 17700$ Ом, $R = 1000$ Ом (сопротивление последовательно подключенного резистора). Начальное значение (при $t = 0$) внутреннего параметра x было взято равным 0.2. На рисунке 2 представлены результаты сравнения вольт-амперных характеристик для расчетных данных (прерывистая линия) и данных эксперимента (тонкие сплошные линии).

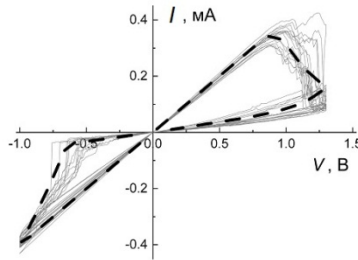


Рис. 2

Третий вариант – это последовательное соединение мемристора и полупроводникового диода. Система уравнений для этого случая следующая:

$$\begin{cases} I = -I_s + \frac{V_T}{R_M} W\left(I_s \frac{R_M}{V_T} \exp\left(\frac{V}{V_T} + I_s \frac{R_M}{V_T}\right)\right), \\ R_M = R_{off} + (R_{on} - R_{off})x, \\ \frac{dx}{dt} = f(x, IR_M). \end{cases} \quad (7)$$

Здесь V_T – температурный потенциал, I_s – ток насыщения, $W(x)$ – специальная функция Ламберта. Для того, чтобы наблюдать последовательность переключений сопротивления мемристора в данной цепи, мемристор должен быть униполярным (с положительными порогами переключения).

Известно, что тонкопленочные структуры, обладающие эффектом резистивного переключения, могут в начальном состоянии (до процесса электроформовки) иметь ВАХ, похожую на характеристику полупроводникового диода [7]. Рассмотрение третьего варианта наводит на мысль, что мемристор до электроформовки можно сопоставить схеме замещения в виде «мемристор-полупроводниковый диод» (при учете омического сопротивления диода). И предположить, что один из результатов электроформовки математически эквивалентен резкому повышению тока насыщения во «встроенном» в структуру диоде, благодаря чему диодные свойства образца исчезают. Альтернативное объяснение может базироваться на модели, согласно которой мемристор

представляется как параллельное соединение двух участков цепи: «мемристор-диод» и «мемристор-резистор». Причем до электроформовки сопротивление резистора очень велико, а в ходе электроформовки оно снижается и шунтирует диод.

В статье [5] (и [6]) также были исследованы варианты «мемристор-катушка индуктивности (L)» и «мемристор-конденсатор (C)».

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{dI}{dt} + IR_M = V, \\ R_M = R_{off} + (R_{on} - R_{off})x, \\ \frac{dx}{dt} = f(x, IR_M). \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{C} \int Idt + IR_M = V, \\ R_M = R_{off} + (R_{on} - R_{off})x, \\ \frac{dx}{dt} = f(x, IR_M). \end{array} \right. \quad (8)$$

В качестве вывода можно отметить - сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показывает, что использованная модель вполне адекватно воспроизводит основные характеристики системы. Предложенное же объяснение процессов электроформовки требует дальнейшего исследования и проверки.

- [1] Chua L.O. // IEEE Trans. 1971. Vol. CT-18, No. 5. P. 507.
- [2] Chua L.O., Kang S. // Proc. IEEE. 1976. Vol. 64, No. 2. P. 209.
- [3] Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. // Nature. 2008. Vol. 453. P. 80.
- [4] Китаев А.Е., Белов А.И., Гусейнов Д.В., Михайлов А.Н. // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68, № 3. С. 295.
- [5] Kitaev A.E., Belov A.I., Guseinov D.V., Mikhaylov A.N. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2023. Vol. 68, No. 3. P. 287.
- [6] Guseinov D.V., Mikhaylov A.N., Pershin Y.P. // IEEE Trans. Circuits Syst. II. Express Briefs. 2022. Vol. 69. P. 1802.
- [7] Ярмаркин В.К., Шульман С.Г., Леманов В.В. // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, № 10. С. 1767.

LOW-FREQUENCY NOISE SPECTROSCOPY APPLICATION FOR NUMERIC ESTIMATION OF NITROGEN ION DIFFUSION JUMPS PARAMETERS IN Si_3N_4 -BASED MEMRISTIVE STRUCTURES

V.S. Kochergin ¹⁾, A.V. Yakimov ¹⁾, A.V. Klyuev ¹⁾, D.O. Filatov ¹⁾, O.N. Gorshkov ¹⁾, D.A. Antonov ¹⁾, A.N. Mikhaylov ¹⁾, O.V. Matorina ¹⁾, N. Vasileiadis ²⁾, P. Dimitrakis ²⁾, B. Spagnolo ^{1,3)}

¹⁾ National Research Lobachevsky State University

²⁾ National Center for Scientific Research “Demokritos”

³⁾ Dipartimento di Fisica e Chimica “Emilio Sergè”

Here, we investigate the microstructure of the electron current through the conducting filament in the low resistance state (LRS) and propose that the low frequency (LF) flicker noise in this current is related to random jumps of nitride ions between the nitride vacancies within and around the filament. These jumps lead to the random telegraph noise (RTN) in the filament conductivity and, as a result, the RTN in the electron current. An ensemble of RTNs, under certain conditions, is manifested as the LF flicker noise. The technique was previously developed for yttria-stabilized zirconia [1–2]. The current in the high resistance state (HRS) was investigated as well, but this one exhibit statistical characteristics close to these one of the experimental setup inner noise.

The method is based on the analysis of the LF flicker noise spectrum in the electron current. Previous investigations of the flicker noise in memristors with macroscopic electrodes have provided a deep insight into the resistance switching (RS) mechanism. Our analysis is carried out taking into account the geometric parameters of the filament. This allows us to estimate the rms magnitude i_0 of the current jumps, which are caused by random jumps of nitrogen ions. The number M of these ions is also estimated.

Jumps of ions affect the conductivity of the filament through two mechanisms. The first is that the ion can jump out of the filament and then come back. Each jump gives rise to the random change of the effective filament diameter. The second mechanism is that the ion may jump inside the filament. The single jump changes the distance of nearby ions almost in one period. As a result, the tunneling conductivity in the vicinity of the jumping ion is changed. These mechanisms produce similar effects in the filament current random modulation.

For simplicity, we believe that a single ion has only two metastable states (“0”, “1”), separated by an energy barrier E , with the difference E_b in the depths of local potential minima. That is, the ion forms a two-level system (TLS). The thermally activated ion transitions between these states lead to RTN in the filament conductivity, and, thus, in the electron current.

The average residence times of the ion in metastable states are determined by Kramers’ law

$$\tau_0 = \frac{1}{f_T} \exp\left(\frac{E}{kT}\right), \tau_1 = \tau_0 \exp\left(\frac{E_b}{kT}\right). \quad (1)$$

Here $f_T \approx 10^{13}$ Hz is the average frequency of the lattice thermal vibrations; k is the Boltzmann constant, and T is the absolute temperature.

Each diffusing ion forms a separate TLS, with the number $m \in [1; M]$. The total electron current $I(t)$ is a superposition of M elementary RTN $i_m(t)$,

$$I_t(t) = \langle I_t(t) \rangle + \sum_{m=1}^M i_m(t). \quad (2)$$

Here the operator $\langle \dots \rangle$ means the ensemble averaging. All RTN have zero mean value, $\langle i_m(t) \rangle = 0$. The RTN consists of rectangular pulses “1”, separated by pauses “0”. The random magnitude of the pulse in the RTN with number m , is a_m . The durations of pulses and pauses τ are distributed according to Boltzmann's law with average values τ_1 and τ_0 ,

$$W_{1,0}(\tau) = \frac{1}{\tau_{1,0}} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{1,0}}\right), \tau \geq 0 \quad (3)$$

The probability of pulses is equal to $p = \tau_1 / (\tau_0 + \tau_1)$.

The spectrum of RTN has the Lorentzian form,

$$S_{RTN}(f|f_c) = A_{RTN} \frac{f_c}{f_c^2 + f^2}. \quad (4)$$

Here, A_{RTN} is determined by the mean square value $\langle a_m^2 \rangle$ of the RTN magnitude, and f_c is the cutoff frequency

$$A_{RTN} = \frac{2}{\pi} \langle a_m^2 \rangle p, f_c = \frac{1}{2\pi} (\tau_0^{-1} + \tau_1^{-1}). \quad (5)$$

The total spectrum is a weighted sum of all RTN spectra,

$$S_{It}(f) = M \int_{(f_c)} S_{RTN}(f|f_c) W_c(f_c) df_c. \quad (6)$$

Here, $W_c(f_c)$ is the probability density function (pdf) of cutoff frequencies; integration is carried out over the band of all cutoff frequencies. To obtain the flicker type spectrum of the type $1/f^\gamma$ it is necessary to have the following pdf

$$W_c(f_c) = \frac{B_c}{f_c^\gamma}; B_c = \frac{1-\gamma}{f_H^{1-\gamma} - f_L^{1-\gamma}}; f_c \in [f_L; f_H]. \quad (7)$$

If $\gamma=1$, then $B_c = 1/\ln(f_H/f_L)$. Using pdf (7) we get the expression for spectrum (6):

$$S_{It}(f) = \frac{A}{f^\gamma}; A = C_A X_A; \quad (8)$$

$$C_A = \frac{p B_c}{\sin(\frac{\gamma\pi}{2})}; X_A = M \langle a_m^2 \rangle.$$

Here, the parameters A and γ of the spectrum are determined from the measurements. To calculate the factor C_A we need to know the probability p . Knowing the parameters A and C_A we can calculate the second factor X_A . This allows us to determine the mean square value $\langle a_m^2 \rangle$, if the number M of ions is known.

Two structures are studied [3]. The first one (the S1 film) comprised a 6 nm Si_3N_4 film deposited onto the substrate directly. The second structure (the S2 stack), a 6 nm Si_3N_4 film is deposited onto a 2-nm thick SiO_2 sublayer grown on the substrate.

It is proposed that the RS is caused by elementary drift/diffusion jumps of defects (presumably, nitrogen vacancies) inside and around the conducting filament, which are affected by supplied voltage V_g .

In the HRS only the experimental setup internal noise is detected for both structures. Thus, the current only in the LRS is investigated.

To reveal the net spectra $S_{\text{net}}(f)$ of the noise generated by the film, we subtract the spectrum $S_0(f)$ of the setup internal noise from the measured raw spectra $S_{\text{raw}}(f)$,

$$S_{\text{net}}(f) = S_{\text{raw}}(f) - S_0(f). \quad (9)$$

Spectra from datasets are fitted by the smoothed function

$$S_{\text{Fit}}(f) = \left(\frac{A}{f^\gamma}\right) + S_0. \quad (10)$$

Knowing γ , and boundaries $[f_L, f_H]$, allows us to determine pdf (7), including B_c . We assume that all the TLS formed by diffusing ions are symmetric, that is $E_b = 0$. Thus, according to Eq. (1), $\tau_0 = \tau_1$. Therefore, we have $p = 0.5$. This provides the estimates for two factors of Eq. (8): C_A , and X_A .

We use geometrical considerations to estimate the number M of ions. The length of the filament is 6×10^{-9} m. The lattice constant of the film is equal to 5×10^{-10} m. We take the diameter of the filament 3×10^{-9} m.

Also, we suppose that almost half of lattice cells in the filament are occupied by diffusing ions, this gives $M \approx 170$. Thus, we find $i_0 = \sqrt{\langle a_m^2 \rangle}$. All data are presented in the Table below.

Datasets	$\langle I \rangle$, nA	σ_{I_t} , nA	A	γ	i_0 , nA
1s1	99	31	35×10^6	1.40	0.50
2s1	81	32	180×10^6	1.50	0.85
3s1	88	25	60×10^6	1.30	0.88
4s1	58	37	90×10^6	1.35	0.94
5s1	34	29	22×10^6	1.35	0.46
6s1	3.0	3.7	1.5×10^6	1.50	0.078
7s1	1.0	1.8	0.14×10^6	1.50	0.024
1s2	2.2	2.5	2.5×10^4	1.00	0.043
2s2	4.1	3.7	5.0×10^4	1.00	0.061
3s2	4.3	2.6	2.5×10^4	1.15	0.028
4s2	0.66	0.39	8.0×10^3	1.00	0.024

In this table, the first column contains the names of datasets. The next two columns contain: the average current $\langle I \rangle$ through the filament, and rms value σ_{I_t} of this current. The following two columns contain parameters A and γ of the spectrum **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, in pA^2/Hz . The last column contains the rms magnitude i_0 .

As a result, the indirect method is developed here for determining the microstructure of the electron current through the nanometer-sized memristor. The method is based on measur-

ing the spectrum of the LF flicker noise in this current, and taking into account the total number of diffusing ions, which affect the electronic transport through the filament. This allows us to estimate the rms value of the electron current jumps, which are caused by random jumps of ions diffusing within and around the conducting filament.

The electron current through the contact of conducting atom force microscope probe to Si_3N_4 structures is investigated. The total number of diffusing ions is determined. Knowing this number allows us to obtain the estimate of the rms current jump magnitude in the LRS. The obtained estimates are of fundamental importance for the understanding of the resistive switching mechanisms in the Si_3N_4 -based memristor as well as for the numerical simulations of memristor devices.

This work was supported by: the Government of the Russian Federation, Agreements No. 074-02-2018-330 (2), and No. 075-15-2021-640; the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the Strategic Academic Leadership Program “Priority 2030”, the priority direction of the development of science, technology and technics in the Russian Federation “Information and telecommunication systems”, the main scientific direction of the UNN “4. Radiophysics and electronics. Physical electronics and quantum electronics. Radio-physical measurements. Statistical Radiophysics and signal processing”, Agreement No. 075-15-2021-1332. The samples for experimental investigations were fabricated within the framework of the Greece–Russia bilateral joint research project MEM-Q supported by GSRT funded by National and European funds (project No. MIS T4ΔPΩ-00030/ 5021467). The measurements were carried out using the shared research facility of Research and Educational Center for Physics of Solid-State Nanostructures at Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod.

- [1] Yakimov A.V., Filatov D.O., Gorshkov O.N., Antonov D.A., Liskin D.A., Antonov I.N., Belyakov A.V., Klyuev A.V., Carollo A., Spagnolo B. // *Appl. Phys. Lett.* 2019. Vol. 114. P. 253506.
- [2] Klyuev A.V., Yakimov A.V., Filatov D.O., Gorshkov O.N., Antonov D.A., Liskin D.A., Antonov I.N., and Anikina Yu.I. *Proc. 25th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF 2019)*. 18–21 June 2019, Neuchâtel, Switzerland. P. 136.
- [3] Vasileiadis N., Loukas P., Karakolis P., Ioannou-Sougleridis V., Normand P., Ntinis V., Fyrigos I.A., Karafyllidis I., Sirakoulis G.Ch., Dimitrakis P. // *Chaos, Solitons and Fractals*. 2021. Vol. 153. P. 111533.

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА РЕЗИСТИВНОЕ СОСТОЯНИЕ МЕМРИСТИВНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ $ZrO_2(Y)$

М.Н. Коряжкина¹), И.Н. Антонов¹), Д.И. Большаков¹), А.Н. Михайлов¹),
Д.О. Филатов¹), О.Н. Горшков¹), Д. Валенти²), Б. Спаньоло^{1, 2})

¹) ННГУ им. Н.И. Лобачевского

²) Университет Палермо

В последние годы интенсивно ведутся исследования и разработки нейроморфных систем, построенных на современной компонентной базе. В отличие от фон Неймановской архитектуры, нейроморфные системы используют принципы работы биологических нейронных сетей, в которых реализуются так называемые “вычисления в памяти”, и могут быть реализованы на основе мемристивных структур и технологий. Принцип работы мемристоров заключается в воспроизводимом изменении резистивного состояния (РС) тонкой диэлектрической пленки, так называемое резистивное переключение (РП). Переключение из состояния с высоким сопротивлением в состояние с низким сопротивлением определяется как SET процесс, а в обратную сторону – RESET процесс. Общепринятым механизмом РП считается восстановление/разрушение филаментов (проводящих областей), образованных внутри диэлектрической пленки, под действием внешнего напряжения. Отличительной особенностью мемристивного устройства является способность плавно изменять свое РС, имитируя при этом работу биологических клеток – синаптическую пластичность (свойство синапсов, проявляющееся в изменении эффективности передачи информации между двумя нейронами в результате внешнего воздействия).

Выполненные к настоящему времени исследования показывают, что нейроморфные системы на основе мемристивных устройств демонстрируют существенный выигрыш в производительности и энергоэффективности [1]. Несмотря на явные преимущества использования мемристивных устройств в нейроморфных системах существует ряд проблем, касающихся характеристик их синаптической пластичности. Одна из них связана с недостаточной стабильностью параметров РП. Высокая степень флуктуаций сопротивления мемристивных устройств отрицательно влияет на точность нейроморфных вычислений [2]. Мемристивные устройства в нейроморфных системах должны обладать большим временем наработки на отказ без снижения производительности [3].

Вышеуказанные проблемы могут быть решены с помощью комбинированного подхода, включающего в себя как правильный выбор материалов электродов и диэлектрической пленки, так и подбор эффективного протокола для изменения РС мемристивного устройства.

В данной работе представлен метод управления синаптической пластичностью мемристивных устройств, основанный на изменении не только амплитуды управляющих импульсов, но и их длительности. В качестве объекта исследования в данной работе выступало мемристивное устройство на основе $ZrO_2(Y)$ благодаря продемонстрированной высокой стабильности их параметров РП [4]. Детальную информацию о технологии изготовления исследованного устройства, параметрах его РП и схематическое изображение экспериментальной установки можно найти в [4]. Измерения были реализованы при помощи устройства National Instruments USB-6341.

Выполнены исследования влияния длительности импульсов с фиксированной амплитудой на РС устройства. Для этого на устройство подавался сигнал, состоящий из последовательности семи импульсов с положительной амплитудой A и одного импульса с отрицательной амплитудой (схематическое изображение одного цикла входного сигнала показано на рис. 1). Величина A имела фиксированное значение в рамках одного эксперимента и варьировалась от эксперимента к эксперименту в диапазоне 0,8 – 1,5 В с шагом 0,1 В. Выбранный диапазон величины A покрывал диапазон напряжений, при которых реализуются изменения РС на вольт-амперных характеристиках [4]. Длительность импульсов с положительной амплитудой в рамках одного цикла входного сигнала последовательно возрастала от 0,5 до 50 мкс и в сумме составляла 88,5 мкс. Импульс с отрицательной амплитудой, равной -2 В, и фиксированной длительностью, равной 50 мкс, подавался на мемристивное устройство с целью его надежного переключения в исходное (или близкое к исходному) состояние с низким сопротивлением. Резистивное состояние устройства считывалось импульсом чтения с амплитудой 0,4 В и длительностью 60 мкс после каждого переключающего импульса.

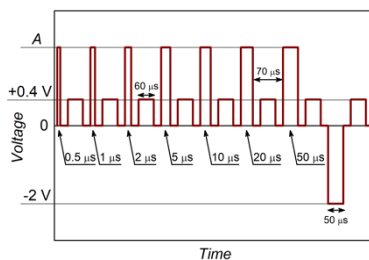


Рис. 1

Отклик мемристивного устройства на входной сигнал обрабатывался следующим образом. Для каждого случая величины A определялась зависимость значений тока, полученных при чтении после конкретного импульса (с положительной амплитудой и определенной длительности или с отрицательной амплитудой), от количества циклов приложения входного сигнала. Полученные на предыдущем этапе обработки значения тока усреднялись отдельно для каждого случая величины амплитуды (положительной или отрицательной) и длительности. Из полученных данных строилась зависимость средних значений тока от длительности импульсов или времени воздействия.

Отклик мемристивного устройства на входной сигнал обрабатывался следующим образом. Для каждого случая величины A определялась зависимость значений тока, полученных при чтении после конкретного импульса (с положительной амплитудой и определенной длительности или с отрицательной амплитудой), от количества циклов приложения входного сигнала. Полученные на предыдущем этапе обработки значения тока усреднялись отдельно для каждого случая величины амплитуды (положительной или отрицательной) и длительности. Из полученных данных строилась зависимость средних значений тока от длительности импульсов или времени воздействия.

На рис. 2-5 показаны зависимости тока от количества циклов приложения входного сигнала, полученные при разных амплитудах положительных импульсов: 1 (рис. 2), 1,1 (рис. 3), 1,3 (рис. 4) и 1,5 В (рис. 5). Установлено, что при подаче последовательности импульсов с положительной амплитудой менее и ~1 В изменение РС (изменение значений тока) отсутствует (рис. 2). При амплитудах > 1 В сопротивление мемристивного устройства существенно возрастало с увеличением длительности импульса (рис. 3-5). При этом увеличение амплитуды приводило к увеличению флуктуаций тока (более $\sim 10^2$) и сбоям в работе устройства, а приложение импульсов с отрицательной амплитудой периодически не переключало устройство в состояние с низким сопротивлением (рис. 5).

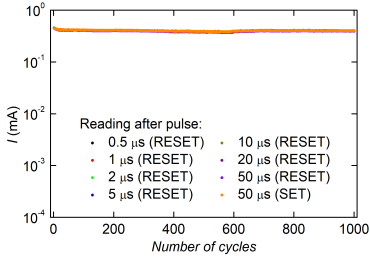


Рис. 2

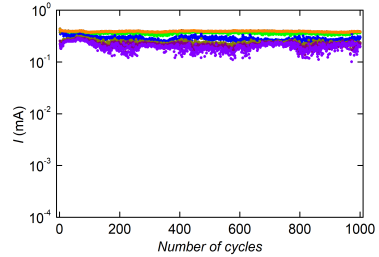


Рис. 3

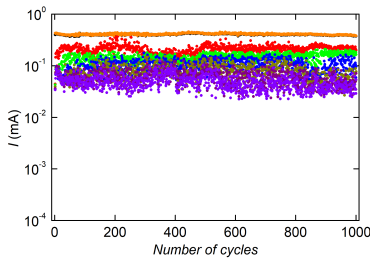


Рис. 4

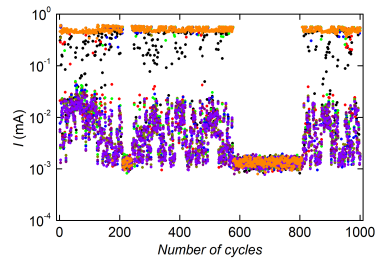


Рис. 5

На рис. 6 показаны зависимости среднего значения тока от длительности импульсов с амплитудой 1,1, 1,2 и 1,3 В. Зависимости могут быть удовлетворительно аппроксимированы экспоненциальной затухающей функцией. Отметим, что наблюдается обратная зависимость коэффициента затухания τ экспоненциальной функции от величины амплитуды положительных импульсов. Значение тока уменьшается в e раз за первые три импульса при приложении входного сигнала с амплитудой 1,3 В и за первые 5 импульсов – с амплитудой 1,2 В. В случае амплитуды 1,1 В значение тока после первого и последнего импульсов отличаются в ~ 2 раза. Также отметим, что значение тока после первого и последнего импульсов в случае 1,2 В отличаются в 5 раз, а в случае 1,3 В – почти на порядок величины.

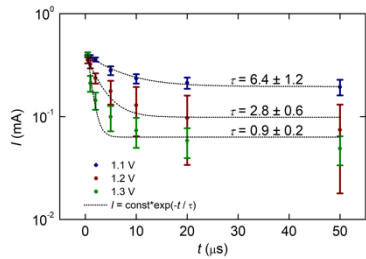


Рис. 6

С целью сравнения воздействия входных сигналов с последовательно увеличивающейся и с фиксированной длительностью импульсов на изменение РС устройства были построены зависимости среднего значения тока от времени воздействия (рис. 7-9). Данные с фиксированной длительностью импульсов (5,5 мкс) были опубликованы ранее в [5]. Под временем воздействия понимается сумма длительностей переключающих импульсов, предшествующих текущему чтению (например, в настоящей работе в условиях входного сигнала, изображенного на рис. 1, время воздействия для значения

тока, полученного при чтении после импульса с длительностью 10 мкс, составляет 18,5 мкс).

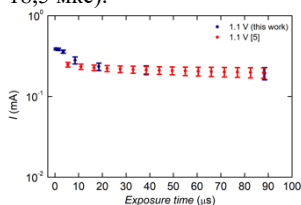


Рис. 7

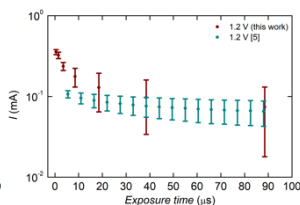


Рис. 8

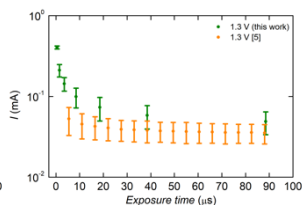


Рис. 9

Видно, что предлагаемый в данной работе протокол позволяет существенно повысить диапазон и скорость изменения РС мемристивного устройства.

Таким образом, представленные в данной работе исследования демонстрируют возможность управления резистивными состояниями мемристивных устройств с использованием вариации не только амплитуды, но и длительности импульсов. Предлагаемый протокол может оказаться более эффективным для управления синаптической пластичностью мемристивных устройств.

Разработка физической модели обнаруженного эффекта будет предметом дальнейших исследований.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах», и государственного задания на создание новых лабораторий для электронной промышленности (FSWR-2022-0009). Коряжкина М.Н. выражает признательность за поддержку в рамках программы стипендий при Президенте Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования – Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

- [1] Mikhaylov A.N., Gryaznov E.G., Koryazhkina M.N. et al. // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. [Отправлена в издательство].
- [2] Liu H., Wei M., Chen Y. // *Nanotechnology Reviews*. 2018. Vol. 7. P. 443.
- [3] Jo S.H., Chang T., Ebong I. et al. // *Nano Letters*. 2010. Vol. 10. P. 1297.
- [4] Koryazhkina M.N., Filatov D.O., Shishmakova V.A. et al. // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022. Vol. 162. P. 112459.
- [5] Koryazhkina M., Okulich E., Ryabova M. et al. // *Proc. of the 6th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications*. 2022. P. 147.

ФОРМИРОВАНИЕ НОВОГО ПРИЗНАКОВОГО ОПИСАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СПАЙКОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ ДЛЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ

А.А. Лебедев, В.Б. Казанцев, С.В. Стасенко

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Исследование кодирования информации в мозге является фундаментальной задачей современной нейродинамики. В последние годы растет интерес к пониманию нейронного кодирования в контексте импульсных нейронных сетей (SNN), которые представляют собой вычислительные модели, основанные на биологорелевантных моделях нейронов.

Одним из важных аспектов нейронного кодирования в SNN является представление информации с помощью последовательностей импульсов. Последовательность импульсов – это последовательности дискретных событий, которые кодируют время и скорость нейронной активности. Для интерпретации процессов кодирования информации были предложены различные подходы, основанные на экспериментальных исследованиях мозга, включая кодирование частоты, временное кодирование и пачечное кодирование [1]. В нашей работе мы использовали спайковое кодирование входного сенсорного стимула в импульсной нейронной сети на основе модели нейрона LIF [2] как новую метрику для задачи классификации.

В общих чертах проблему классификации можно описать следующими шагами:

- выделение признакового пространства на основе соображений о характере данных;
- кодирование данных в выбранном метрическом пространстве;
- разделение пространства на классы в соответствии с выбранной метрикой;
- оценка результатов на основе статистики, полученной из "неизвестной" выборки.

Классическая задача классификации изображений требует наличия большого количества однотипных размеченных данных, которые могут быть легко обработаны и проанализированы. Чтобы исследовать проблему выделения пространства признаков с помощью спайковой нейронной сети, мы выбрали базу данных MNIST [3]. Каждое изображение в наборе данных представляет собой одноканальную квадратную матрицу, состоящую из 784 пикселей, каждый из которых кодируется одним байтом. В нашей работе особое внимание уделяется атрибутивному пространству и качеству его выбора, на которое влияет синаптическая пластичность модели спайка.

На рисунке приведена схема модели. Здесь красным цветом обозначена группа возбуждающих нейронов, зеленым – тормозных.

В качестве метрики для выделения признакового пространства и решения задачи классификации нами было выбрано количество спайков тормозного слоя нейронной сети за время стимуляции изображением следующим способом:

- подача изображения – 350 миллисекунд;
- период молчания – 150 миллисекунд.

В результате были созданы и протестированы 4 конфигурации модели спайковой нейронной сети с различными конфигурациями синаптических пластичностей. В качестве результата была построена сравнительная таблица точностей классификации серии из 1000 изображений из 3 классов: «0», «1» и «8».

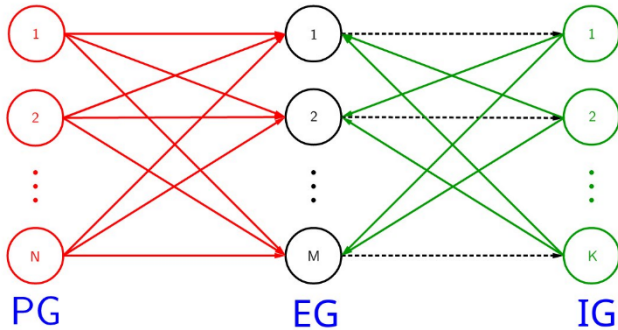


Рис.

Классификация производилась алгоритмом Random Forest с ограничением на максимальную глубину дерева – 4.

Было получено, что наилучшая точность классификации 3 классов изображений достигается при конфигурации модели только с возбуждающей STDP, а наихудшая при наличии только тормозной STDP.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Нижегородской области для молодых ученых 2023 г. (рук. Стасенко С.В.).

- [1] Guo W., Fouda M.E., Eltawil A.M., Salama K.N. // *Frontiers in Neuroscience*. 2021. Vol. 15. P. 638474.
- [2] Börgers C. *An introduction to modeling neuronal dynamics*. – Berlin: Springer, 2017, 445 p.
- [3] Deng L. // *IEEE signal processing magazine*. 2012. Vol. 29, No. 6. P. 141.

КМОП-ИНТЕГРАЦИЯ МЕМРИСТИВНЫХ УСТРОЙСТВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ RRAM НА ОСНОВЕ ТЕХПРОЦЕССА КНИ 0.35

А.Н. Михайлов, О.Н. Горшков, А.И. Белов,
И.Н. Антонов, В.И. Лукоянов, В.Е. Котомина, Е.Г. Грязнов

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

На сегодняшний день мемристовые структуры, проявляющие эффект резистивного переключения, находят применение во многих областях электроники и информационных технологий. Интерес к памяти RRAM вызван такими ее преимуществами, как масштабируемость и простота технологии изготовления, достижимость быстрого и энергоэффективного функционирования. В то же время, практическая реализация таких устройств затрудняется стохастической природой резистивного переключения и разбросом параметров элементов памяти. Кроме того, на стабильность работы памяти влияет технология изготовления (проектные нормы, технологический процесс, выбор материалов и конструкции ячеек памяти).

В данной работе были исследованы различные конструкционные варианты ячеек памяти в составе тестового кристалла. Тестовый кристалл изготовлен по технологии КМОП КНИ 0,35 мкм с четырьмя уровнями металлизации (рис. 1).

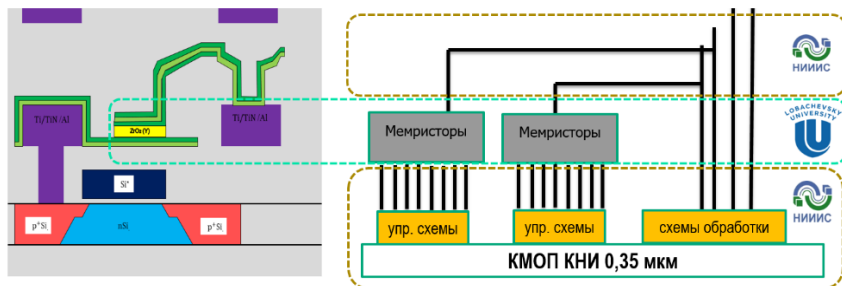


Рис. 1

При этом приборный слой с управляющими элементами формируется в промышленных условиях, а верхние слои микросхемы – в лабораторных условиях. На рис. 2 представлена топология тестового кристалла с демонстрацией массивов ячеек памяти типа 1T1M, 4T2M.

Схематическая реализация классической ячейки 1T1M [1] и её топология в разрезе представлена на рис. 3 и 4 соответственно. Здесь, n – канальный транзистор работает в ключевом режиме при подаче определённого напряжения на его затвор и реализуются классические варианты включения транзистора с резистивной нагрузкой – однокаскадный усилитель (Common Source Stage) и истоковый повторитель (Source Follower). При этом, такой вариант ячейки оптимален при больших сопротивлениях мемристовых устройств.

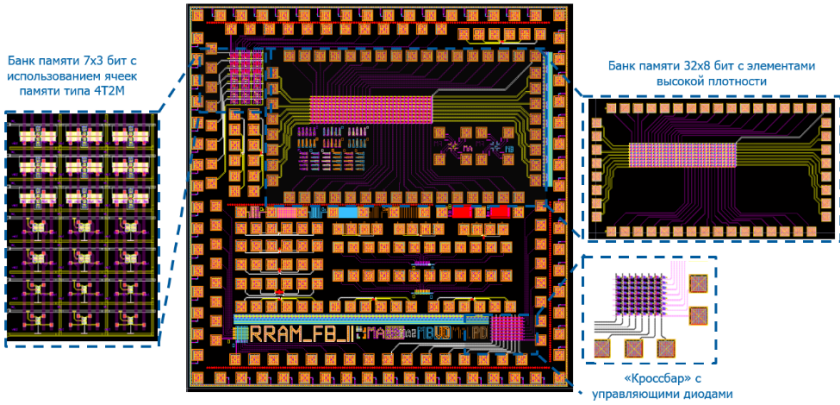


Рис. 2

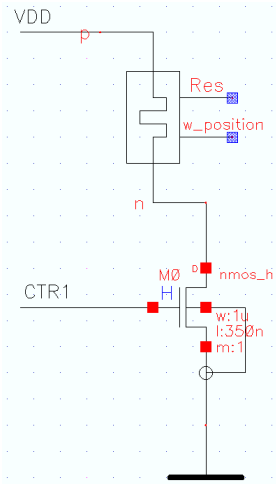


Рис. 3

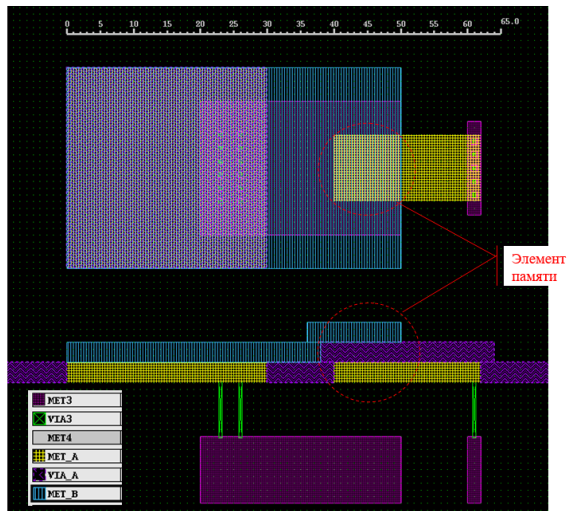


Рис. 4

Гораздо стабильнее ведёт себя ячейка 4Т1М, один из схемотехнических вариантов реализации которой представлен на рис. 5.

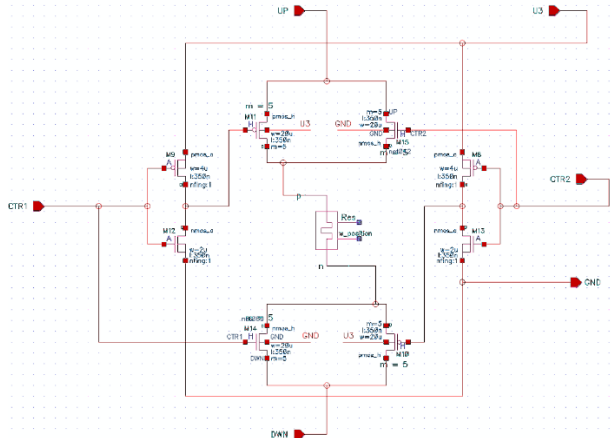


Рис. 5

Здесь, пара перекрёстных комплементарных транзисторов работает в ключевом режиме, обеспечивая доступ к потенциалу питания (р – канальный транзистор) и потенциалу земли (п – канальный транзистор). При этом, в этой конструкции неоднозначные состояния транзисторов исключаются (транзисторы полностью открыты и находятся в насыщении), и диапазон сопротивлений мемристивной структуры может быть любым. Логические уровни задают необходимый потенциал на затворе соответствующих транзисторов. Считывание происходит при приложении напряжения малой полярности при работе одной пары ключей.

Некоторые схемотехнические решения (ячейка памяти конструкции 4Т1М, блок определения порядка времени переключения, блок резистивного переключения мемристивного устройства путём разрядки конденсатора дуальной полярности, матричные операции в кроссбаре) предстоит проверить в дальнейшем на следующей партии тестовых микросхем памяти.

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах»).

[1] Vishwakarma A., Ampadu K.O., Huebner M., Vishwakarma S., Reichenbach M. // CC BY 4.0. 2023. Vol. 218. P. 563.

РЕЗИСТИВНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В МЕМРИСТИВНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ $ZrO_2(Y)$ И Al_2O_3

Д.А. Серов, М.Е. Шенина, И.Н. Антонов, М.Н. Коряжкина, А.В. Круглов, А.Н. Михайлов, О.Н. Горшков

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

В последнее время ведутся активные исследования и разработки нового типа резистивной (мемристивной) памяти. Такая память в ближайшее время может стать основой для создания нового типа вычислительной техники и нейроморфных устройств. Функционирование мемристоров основано на эффекте воспроизводимого резистивного переключения (РП) из состояния с низким сопротивлением (ON) в состояние с высоким сопротивлением (OFF), т. н. Reset процесс, и обратно, т. н. Set процесс. Их широкое практическое применение сдерживается существенной нестабильностью параметров РП. Решение этой проблемы может быть основано на применении многослойных диэлектриков в качестве функционального слоя [1, 2].

В настоящей работе исследовано влияние толщины слоя Al_2O_3 на характеристики и параметры РП мемристивных структур $Ta/Al_2O_3/ZrO_2(Y)/Pt$. Оксид Al_2O_3 имеет сравнительно большую энергию образования вакансий кислорода и высокий энергетический барьер для миграции вакансий кислорода в процессе РП, что должно затруднять транспорт через интерфейс ионов кислорода в химически активный электрод Ta, а также снизить вероятность образования новых вакансий в слое $ZrO_2(Y)$ во время многократных циклов РП. Ожидается, что наличие слоя Al_2O_3 повысит стабильность количества вакансий в структуре филамента в области интерфейса (участок филамента ответственный за РП) и стабилизирует параметры мемристора [3].

На рис. 1 представлено схематическое изображение исследованных структур, полученных методом магнетронного распыления. Исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) и проведение теста на выносливость выполнено с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500 A и многофункционального устройства ввода-вывода National Instruments USB-6341. Для проведения теста на выносливость на структуры подавался сигнал, состоящий из чередующихся положительных и отрицательных переключающих импульсов и импульсов чтения (рис. 2). Схематическое изображение экспериментальной установки для проведения теста на выносливость можно найти в [4].

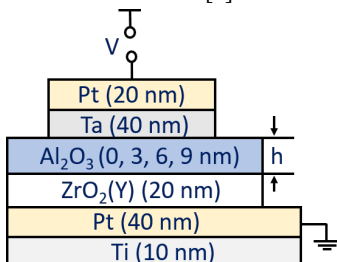


Рис. 1

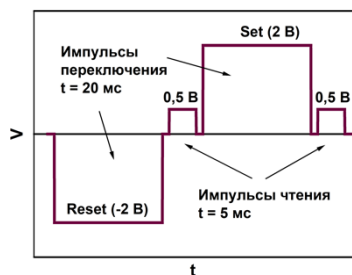


Рис. 2

Электроформовка структур происходила в положительной области напряжений. На рис. 3 представлена зависимость напряжения электроформовки V_F от толщины Al_2O_3 . Было установлено, что наименьшее значение V_F демонстрировал образец с Al_2O_3 толщиной 3 нм.

После проведения электроформовки были измерены ВАХ мемристивных структур. Полученные ВАХ свидетельствуют о биполярном типе РП (рис. 4 и рис. 5). Структура без слоя Al_2O_3 (рис. 4) демонстрирует менее стабильные ВАХ, чем образец со слоем Al_2O_3 толщиной 3 нм (рис. 5).

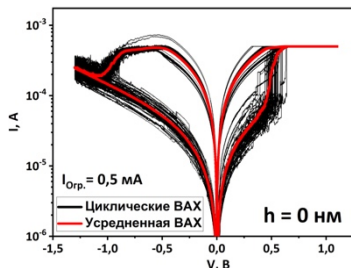


Рис. 4

На основе полученных ВАХ были определены напряжения РП. У всех исследуемых структур напряжение Set меньше напряжения Reset (по модулю), что может быть связано с асимметрией барьеров в структурах металл-диэлектрик-металл. С ростом толщины слоя Al_2O_3 в среднем значение напряжения Set увеличивается от 0,58 В до 0,81 В, а напряжение Reset имеет немонотонное поведение, но в целом изменяется от -0,94 В до -1,11 В (рис. 6).

Типичные коридоры тока исследованных структур, полученные в импульсном режиме, представлены на рис. 7 и 8. Структуры без слоя Al_2O_3 демонстрирует меньший коридор токов по сравнению со структурой с дополнительным слоем Al_2O_3 . Все исследуемые структуры переключаются более 10^4 раз, при этом не происходит «схлопывание» или существенная деградация коридора токов.

Для численной оценки разброса токов в состояниях OFF и ON были посчитаны коэффициенты вариации C_V . Зависимости C_V от толщины Al_2O_3 (рис. 9) имеют немонотонный характер как для состояния OFF, так и для состояния ON. В целом, значения C_V

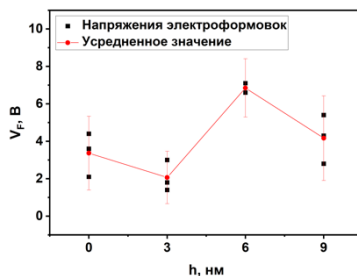


Рис. 3

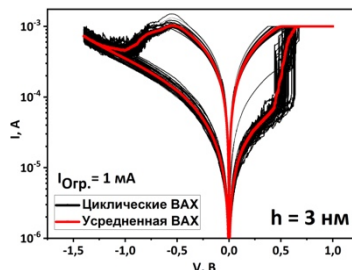


Рис. 5

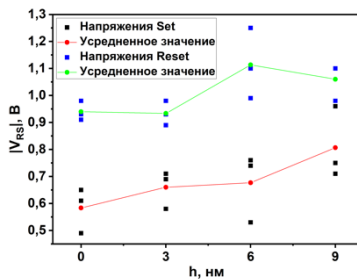


Рис. 6

в состоянии ON меньше, чем в состоянии OFF (исключение составляет образец с толщиной Al_2O_3 9 нм). Это свидетельствует о меньшем разбросе тока в состоянии ON по сравнению с состоянием OFF.

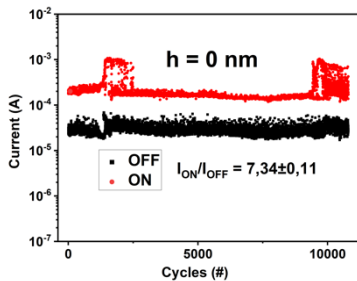


Рис. 7

Таким образом, введение слоя Al_2O_3 определенной толщины приводит к уменьшению разброса значений токов в процессе РП (рис. 4 и рис. 5) и увеличению отношения токов в OFF и ON состояниях (рис. 7 и рис. 8). При этом напряжения электроформовки и РП слабо зависят от толщины слоя Al_2O_3 .

Работа выполнена в рамках гос. задания № FSWR-2022-0009. Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования – Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

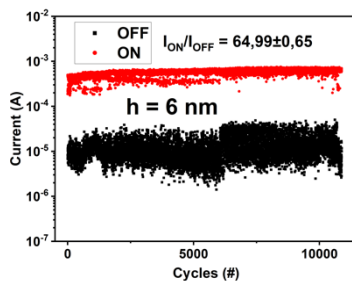


Рис. 8

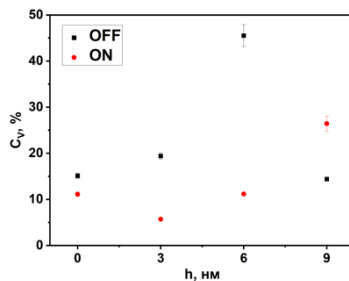


Рис. 9

- [1] Tran X.A., Yu H.Y., Gao B., et al. // IEEE Electron Device Letters. 2011. Vol. 32. P. 1290.
- [2] Chen Z., Zhang F., Chen B. et al. // Nanoscale Research Letters. 2015. Vol. 10. P. 70.
- [3] Ismail M., Mahata C., Kang M. et al. // Nanoscale Research Letters. 2022. Vol. 17. P. 61.
- [4] Koryazhkina M.N., Filatov D.O., Shishmakova V.A., et al. // Chaos, Solitons & Fractals. 2022. Vol. 162. P. 112459.

КОНЦЕПЦИЯ МЕМРИСТОРНЫХ НЕЙРОМОРФНЫХ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

С.А. Щаников, И.А. Борданов

ВлГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

Массивы мемристивных устройств, соединенные с фотосенсорами, могут быть использованы для фиксации визуальной информации и ее последующей обработки, реализуя тем самым концепцию «in-sensor computing» [1, 2], связанную с разработкой компактных, маломощных вычислительных устройств, которые можно интегрировать с сенсорными элементами, чтобы постепенно отойти от повсеместно применяемой технологии «тонкого клиента» к обработке (частичной или полной) данных непосредственно этими элементами.

Наиболее оптимальным с точки зрения минимизации номенклатуры используемых компонентов и максимально возможного ухода от цифровой электроники является вариант сопряжения фотосенсоров с массивами мемристивных устройств в топологии «кросс-поинт». На рисунке 1 показан разработанный вариант сопряжения фотосенсоров и мемристивных устройств, а именно модель одного входного канала в программе LTSpice.

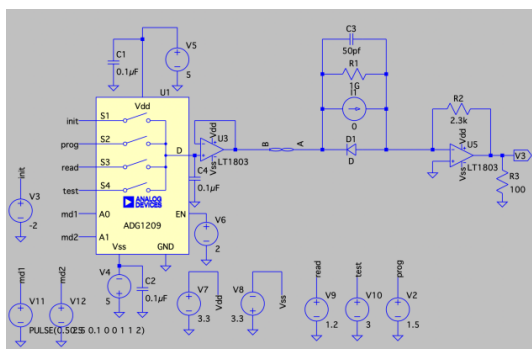


Рис. 1

Такой вариант сопряжения подходит для одновременной регистрации визуальной информации и подачи сигналов в искусственную нейронную сеть (ИНС) для традиционных формальных архитектур ИНС (персептрон, глубокая нейронная сеть, сверточная нейронная сеть, сеть Хопфилда), в которых вектор входных данных кодируется амплитудами напряжений входных импульсов, формируемых в данном случае за счет падения напряжений импульсов чтения визуальной информации пропорционально сопротивлениям мемристивных устройств, полученным после экспонирования. Для данного варианта сопряжения разработана также модификация для спайковых ИНС, в которых обучение происходит на основе локальных правил STDP (spike-timing-dependent plasticity). Во втором случае исходный вариант дополнительно оснащается входными нейронами типа «integrate-and-fire». В результате падения напряжений импульсов чте-

ния визуальной информации, на входы нейронов «integrate-and-fire» в течении определенного времени поступает разный заряд, и формирование импульсов на выходах данных нейронов происходит с разной частотой.

Основное отличие разработанного варианта архитектуры от опубликованных в российских и зарубежных статьях, состоит в том, что это полностью аналоговая система, начиная от ввода информации, заканчивая выводом информации.

В процессе аппаратной реализации компонентов нейроморфной системы аналогового машинного зрения на базе мемристивных устройств, был пройден путь от создания простых макетов с применением контактных макетных плат (“bradboard”), до создания макетов и прототипов на базе печатных макетных плат и сквозного и поверхностного монтажа. Первые варианты входного канала не имели возможности программного управления параметрами подаваемых сигналов, что приводило к существенным затратам времени на перенастройку при проведении экспериментов. В итоге было принято решение о создании стенда (рисунок 2), имеющего модульную структуру (модуль управления, генератор, приемник, модуль питания) и управляемого программно через микроконтроллер (МК), подсоединенный по USB к компьютеру.

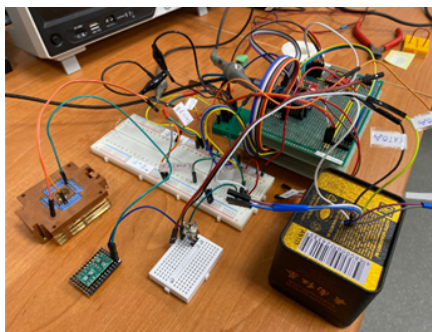


Рис. 2

В последующем для фиксации видеоинформации можно будет использовать светочувствительные мемристоры на базе МДМ-структур. По сравнению с цифровыми системами машинного зрения такой подход позволит значительно снизить потребление энергии и создавать носимую и бортовую электронику с уникальными тактико-техническими характеристиками.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-71-00136.

- [1] Li M.Z., Guo L.C., Ding G.L., et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. 2021. Vol. 13, No. 26. P. 30861.
- [2] Wang T.Y., Meng J.L., Li Q.X., et al. // Nano Energy. 2021. Vol. 89. P. 106291.

МОДЕЛЬ АСТРОЦИТАРНОЙ РЕГУЛЯЦИИ ПРОЦЕССОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ТОРМОЖЕНИЯ СПАЙКОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

С.В. Стасенко, В.Б. Казанцев

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Формирование пачечной активности в нейронных сетях мозга является распространенным явлением [1], связанным как с процессами передачи информации, так как и нарушениями. Активно исследуются механизмы регуляции нейронной активности, в частности пачечной активности [2]. Одним из механизмов регуляции пачечной активности является кратковременная синаптическая пластичность. Относительно недавно в экспериментальных работах было показано, что в процессах регуляции пачечной активности также участвуют астроцитарные клетки [3]. Исследование активно идет в последнее время и связано с их участием в модуляции нейронной активностей в процессе передачи информации [4-6].

Включение астроцитов в классическую схему «пресинапс-постсинапс» привело к формированию концепции тройственного синапса [7, 8], основанную на том, что глиальные клетки (астроциты) через кальций-зависимое высвобождение глиатрансмиттера (глутамата) способны воздействовать на пре- и постсинаптические компартменты синапса. При генерации спайков на пресинаптическом нейроне происходит высвобождение нейротрансмиттера (к примеру, глутамата) из пресинаптической терминали. Часть нейротрансмиттера может диффундировать вне синаптической щели и связываться на метаболитных глутаматных рецепторах (mGluRs) астроцита, который может быть расположен вблизи пресинаптической терминали. Активация метаболитных глутаматных рецепторов G-опосредованно приводит к образованию инозитол-1,4,5 –трифосфата (ИТФ). ИТФ диффундирует внутри клетки и связывается на ИТФ зависимых рецепторах эндоплазматического ретикулума (ЭПР) и приводит к высвобождению Ca^{2+} в цитоплазму. Увеличение свободного кальция в астроците может приводить к высвобождению глиатрансмиттеров (к примеру, глутамата, аденозинтрифосфата (АТФ), D-серина, ГАМК) в синаптическую щель и во внесинаптическое пространство и последующему модуляционному воздействию на синаптическую передачу при связывании на пре/ или постсинаптических рецепторах [9].

В данной работе предлагается модель регуляции процессов возбуждения и торможения спайковой нейронной сети глиальными клетками - астроцитами. Модель нейрона описывается уравнениями Ижикевича [10]. Нейрон-глиальное взаимодействие описывается феноменологическим подходом, предложенным в работе [11,12]. Нейронная сеть состоит из 300 нейронов, 80 % из которых – возбуждающие нейроны, 20 % – тормозные нейроны. Вероятность связи возбуждающих нейронов – 5 %, вероятность связи тормозных нейронов – 10 %. На каждый нейрон подается внешний шум, имеющий равномерное распределение от 0 до 1. На нейронную сеть в течении 300 мс подается изображение, пиксели которого преобразуются в ток от 0 до 1, во временной развертке на слой возбуждающих и тормозных нейронов. Было получено, что подаваемое изображение приводило к формированию пачечного режима активности сети, что скрывало изображение (рис. 1), предъявляемое нейронной сети. В то же время синаптическая депрессия вероятности высвобождения нейротрансмиттера возбуждающих синапсов приводила к десинхронизации нейронов и разрушению пачечной активности,

что позволяло проявить изображение (рис. 2). Таким образом, было показано, что астроциты играют важное значение в процессах преобразования и передачи сигналов на нейрональное рецептивное поле.

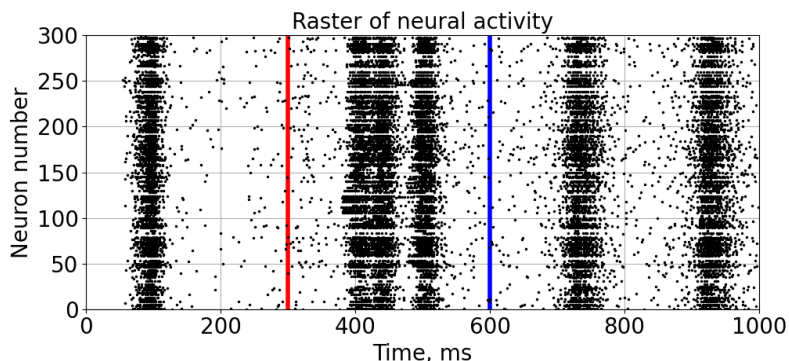


Рис. 1

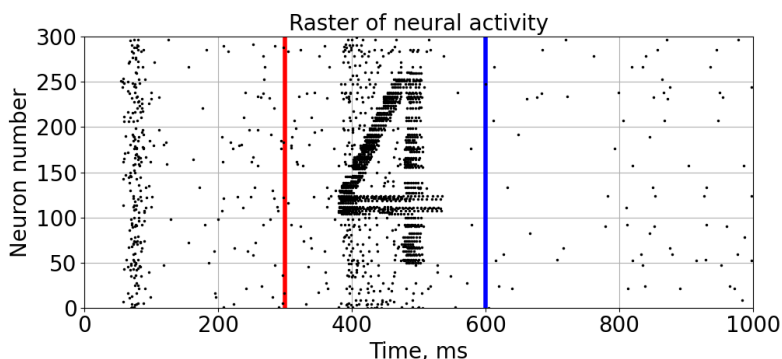


Рис. 2

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №22-71-00074.

- [1] Wagenaar D.A., Pine J., Potter S.M. // BMC neuroscience. 2006. Vol. 7, No. 1. P. 1.
- [2] Wagenaar D.A., Madhavan R., Pine J., Potter S.M. // Journal of Neuroscience. 2005. Vol. 25, No. 3. P. 680.
- [3] Kumar R., Huang Y.T., Chen C.C., Tzeng S.F., Chan C.K. // Cerebral Cortex Communications. 2020. Vol. 1, No. 1. P. tga053.
- [4] Verkhratsky A., Butt A. Glial Neurobiology. – Wiley: John Wiley&Sons, 2007, p.83.
- [5] [Perea G](#), Navarrete M, [Araque A](#). // [Trends Neurosci](#). 2009. Vol. 32, No. 8. P. 421.
- [6] Halassa M.M., [Fellin T](#), [Haydon P.G](#). // [Trends Mol. Med](#). 2007. Vol. 13, No. 2. P. 54.
- [7] Araque A. et al. // Trends Neurosci. 1999. Vol. 22, No. 5.
- [8] Haydon P.G. // Nat. Rev. Neurosci. 2001. Vol. 2, No. 3. P. 185.

- [9] Perea G., Navarrete M., Araque A. // Trends Neurosci. 2009. Vol. 32, No. 8. P. 421.
- [10] Izhikevich E. Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting – Cambridge, MA: MIT Press, 2006, 522 p.
- [11] Gordleeva S.Y. et al. // Front. Comput. Neurosci. 2012. Vol. 6. P. 92.
- [12] Lazarevich I.A., Stasenko S.V., Kazantsev V.B. // JETP Lett. 2017. Vol. 105, No. 3. P. 210.

ИСКУССТВЕННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ С МОДЕЛЬЮ ДИНАМИЧЕСКОГО СИНАПСА

И.А. Зимин, С.В. Стасенко

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Кратковременная память (рабочая память) широко исследуется современной нейронаукой, так как она является важной когнитивной функцией, позволяющей мозгу временно хранить информацию для последующей ее обработки в процессе решения текущих задач. имитация различных функций мозга легла в основу ряда технических решений, расширяющих базовый функционал нейронных сетей. В частности, имплементация кратковременной памяти в искусственные нейронные сети привела к появлению целого вида архитектур - рекуррентных нейронных сетей. Самый известной первой моделью является сеть Хопфилда. К настоящему моменту предложено огромное разнообразие архитектурных решений для рекуррентных сетей, в том числе с долговременной и кратковременной памятью и управляемым рекуррентным блоком. Текущей проблемой данных архитектур, как и в целом искусственных нейронных сетей, является то, что они, имитируя некоторый принцип работы, к примеру, кратковременной памяти, выдают результат, плохо интерпретируемый. Наиболее перспективными направлениями, обладающим интерпретируемостью и возможностью развития по мере появления новых экспериментальных данных о работе мозга, являются спайковые нейронные сети, или гибридные подходы, совмещающие искусственные нейронные сети и модели вычислительной нейронауки.

В нашей работе предлагается гибридная архитектура нейронной сети с моделью динамического синапса для задачи воспроизведения эффекта кратковременной памяти. В экспериментальных работах было показано, что кратковременная память может осуществляться за счет постоянной нейронной активности или за счет кратковременной синаптической пластичности [1]. В нашей архитектуре модель динамического синапса включает как кратковременную синаптическую пластичность, так и астроцитарную модуляцию [2, 3]. Было показано, что астроцит в ответ на активацию нейротрансмиттера, высвобожденного из пресинаптической терминали, может привести к модуляции синаптической передачи при связывании с пресинаптическими или постсинаптическими рецепторами [2]. Использование астроцитарной модуляции позволяет также расширить временной диапазон модуляции нейронной активности, по сравнению с кратковременной синаптической пластичностью и поддержать баланс возбуждения/торможения сети, обеспечения гомеостаз. В качестве модели кратковременной синаптической пластичности использовалась модель Цодыкса-Марккрама [4], а для описания астроцитарной модуляции использовалась модель астроцитарной активности, представленная в работах [5].

На наборе данных, состоящем из 8 изображений из датасета CIFAR-10, была предобучена свёрточная нейронная сеть, содержащая два полносвязных и два свёрточных нейронных слоя (рис. 1). Выходные данные последнего слоя (64 нейрона) данной сети использовались как вход для модели, имитирующей кратковременную память.

Предложенная архитектура нейронной сети была протестирована на задаче определения в последовательности предъявляемых изображений ранее запомненных и но-

вых. Также она была сравнена с моделями STPNet (с только кратковременной синаптической пластичностью) и RNN (рекуррентной нейронной сетью) на ранее описанной задаче. С помощью метрики (d-prime), в первые предложенной в работе [1] для такого типа задачи, было показано, что наша архитектура нейронной сети с астроцитарной модуляцией демонстрирует лучший показатель по точности классификации ранее запомненных и новых изображений (рис. 2).

Model	Network architecture									Params
STPNet	<i>conv5-8</i>	<i>maxpool</i>	<i>conv5-16</i>	<i>maxpool</i>	<i>FC-128</i>	<i>FC-64</i>	<i>FC-16</i>	<i>FC-1</i>	<i>sigmoid</i>	64715
RNN	<i>conv5-8</i>	<i>maxpool</i>	<i>conv5-16</i>	<i>maxpool</i>	<i>FC-128</i>	<i>FC-64</i>	<i>RC-16</i>	<i>FC-1</i>	<i>sigmoid</i>	64971
STPRNN	<i>conv5-8</i>	<i>maxpool</i>	<i>conv5-16</i>	<i>maxpool</i>	<i>FC-128</i>	<i>FC-64</i>	<i>FC/RC-16</i>	<i>FC-1</i>	<i>sigmoid</i>	65995

Рис. 1

model	mean	std
RNN	1.33	0.578
STPNet	1.47	0.127
SNANet	1.53	1.33

Рис. 2

В части математической формализации модели работы выполнены при поддержке гранта РФФ №22-71-00074, в части обучения модели работы выполнены при поддержке Программы развития регионального научно-образовательного математического центра «Математика технологий будущего», проект № 075-02-2020-1483/1.

- [1] Hu B., Garrett M.E., Groblewski P.A., Ollerenshaw D.R., Shang J., Roll K., Mihalas S. // PLoS computational biology. 2021. Vol. 17, No. 9. P. e1009246.
- [2] Perea G., Navarrete M., Araque A. // Trends Neurosci. 2009. Vol. 32, No. 8. P. 421.
- [3] Halassa M.M., Fellin T., Haydon P.G. // Trends Mol Med. 2007. Vol. 13, No. 2. P. 54.
- [4] Mongillo G., Barak O., Tsodyks M. // Science. 2008. Vol. 319. P. 1543.
- [5] Gordleeva S.Y., et al. // Front. Comput. Neurosci. 2012. Vol. 6. P. 92.

Секция «Стохастические мультистабильные системы»

Заседание секции проводилось 18 мая 2023 г.
Сопредседатели – Б. Спаньоло (Италия), А.А. Дубков, секретарь – А.А. Харчева.
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.