

Труды XXVIII научной конференции по радиофизике

**СЕКЦИЯ  
«СТОХАСТИЧЕСКИЕ МУЛЬТИСТАБИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»**

Сопредседатели – Б. Спаньолю (Италия), А.А. Дубков, секретарь – О.Н. Минаева.  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

## ОТКЛИК МЕМРИСТОРА НА ВНЕШНИЙ ШУМОВОЙ СИГНАЛ

Д.О. Филатов, Д.В. Вржец, А.А. Дубков

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

### Введение

Настоящая работа посвящена исследованию поведения мемристора при воздействии внешних шумов. Мемристор - относительно новый объект исследования, представляющий собой нанoeлектронный прибор на основе конденсаторной структуры, способной изменять сопротивление  $R$  в бистабильном (или мультистабильном) режиме под действием напряжения  $V$ , приложенного к обкладкам [1]. Мемристоры считаются перспективными для энергонезависимой компьютерной памяти, нейроморфных вычислений и т.д. Их принцип действия основан на образовании и разрыве проводящих шнуров (филаментов) между обкладками. В мемристорах на основе оксидов филаменты состоят из вакансий кислорода ( $V_O$ ). Разрыв/восстановление филаментов происходит за счет дрейфа/диффузии  $V_O$ . Оба процесса имеют стохастическую природу. Таким образом, мемристор представлял собой стохастическую мультистабильную систему. Однако, флуктуационные процессы в мемристорах до сих пор недостаточно изучены, и адекватная стохастическая модель отсутствует. Для описания поведения мемристора под действием внешнего шума можно использовать известные модели мультистабильных стохастических систем, например, модель броуновского движения в бистабильном потенциале [2], которая может быть описана уравнением Ланжевена с источником шума [3]. Если принять  $R$  в качестве переменной состояния мемристора и рассмотреть динамику  $R$  как движение броуновской частицы в эффективном потенциале  $U(R)$  с двумя минимумами, так что напряжение  $V = -\partial U / \partial R$  является движущей силой резистивного переключения (РП). Предположим, что частица находится в яме с локальным минимумом при  $R = R_{ON}$  (состояние низкого сопротивления, СНС). При приложении напряжения  $V$  потенциал  $U(R)$  наклоняется, так что частица перемещается в другую яму (состояние высокого сопротивления, СВС) с локальным минимумом при  $R = R_{OFF}$  и остается там после выключения  $V$ . Это формально моделирует РП из СНС в СВС и эффект памяти. Мемристор можно переключить обратно, подав напряжение противоположного знака.

Известно, что частица в описанной системе может перемещаться между двумя ямами под действием внешних или внутренних шумов. В этом случае зависимость  $R(t)$  имеет характерную форму, называемую случайным телеграфным сигналом (СТС) [2]. Средняя частота прыжков называется частотой Крамерса  $f_K$ . Ранее реакция мемристора на основе  $ZrO_2(Y)$  на гауссовский белый шум была исследована экспериментально [4]. При определенных параметрах шумового сигнала (стандартное отклонение  $\sigma$  и среднее значение  $V_{vias}$ ) мемристор переключался между СНС и СВС. Пример осциллограммы тока, проходящего через мемристор,  $I(t)$  в этом режиме, показан на рис. 1 (кривая 1). Кроме того, на рис. 1 показан пример зависимости  $R(t)$  (кривая 2), рассчитанного из  $I(t)$  по [4]. Осциллограмма  $R(t)$  имеет вид, типичный для СТС. Этот результат подтвердил применимость модели Крамерса к описанию мемристора. Тем не менее, многие аспекты влияния шума на динамику мемристора еще не изучены.

Настоящая работа посвящена дальнейшим исследованиям реакции мемристора на шумовой сигнал. Процедура подготовки образцов и методика проведения эксперимента описаны в [4].

**Экспериментальные результаты**

На рис. 2 показан пример спектра мощности  $S(f)$  тока  $I(t)$ , показанного на рис. 1 (кривая 1). Спектр мощности  $S(f)$  имеет форму Лоренца:  $S \sim 1/f^2$  с эквидистантными провалами.

Данный результат говорит о том, что мемристор поглощает энергию шумового сигнала не равномерно по всему спектру, а резонансным образом, на определенных частотах, внутренне присущих мемристор. Заметим, что решение исходной задачи Крамера дает Лоренцев спектр для СТС процесса без провалов. Основное различие между оригинальной моделью Крамера и мемристором заключается в том, что в последнем случае СТС наблюдается в осциллограмме  $R(t)$ . Для идеализированного мемристора с линейными вольтамперными характеристиками, при подаче на него гауссовского шума  $V(t)$ , распределение  $I(t)$  также является гауссовым. Однако ширина распределения  $I(t)$  в СНС больше, чем в СВС [4]. В результате, когда мемристор переключается между СНС и СВС в режиме СТС, интенсивность шумовой составляющей  $I(t)$  модулируется синхронно с переключением  $R(t)$ . Таким образом, провалы в  $S(f)$  наблюдаются при  $f_K$  и её высших гармониках. Чтобы подтвердить данный вывод, из осциллограмм  $R(t)$  были определены средние значения временных интервалов, в течение которых мемристор находится в СНС и в СВС, и соответствующие значения  $f_K$ . Полученные результаты согласуются с частотами провалов в спектрах  $S(f)$  с точностью до порядка величины. Заметим, что провалы в спектрах  $S(f)$  не наблюдались, когда в осциллограммах  $R(t)$  не наблюдался СТС. Следует также отметить, что при наличии постоянного смещения  $V_{bias}$  в шумовом сигнале  $V(t)$  средние значения  $I(t)$  в СНС и в СВС также переключаются между двумя значениями в режиме СТС синхронно с  $R(t)$  [4]. Данная составляющая  $I(t)$  порождает компоненту  $1/f^2$  в  $S(f)$ .

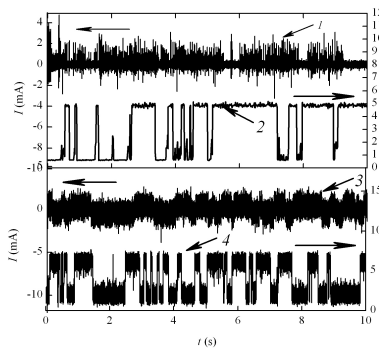


Рис. 1

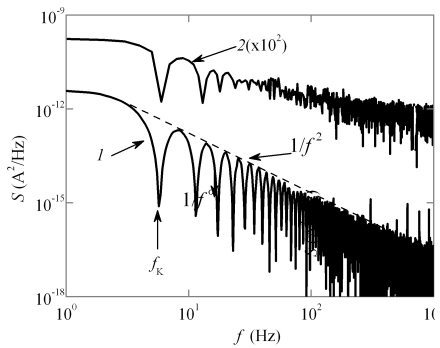


Рис. 2

**Моделирование**

Чтобы подтвердить вышеприведенные предположения, численно решали уравнение Ланжевена

$$\eta \frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial R} U(R) + \zeta(t) \quad (1)$$

для симметричного потенциала

$$U(R) = U_0 \left[ \left( \frac{R}{\Delta R} \right)^2 - 1 \right]^2, \quad (2)$$

где  $U_0$  – высота барьера между ямами,  $\Delta R = R_{\text{OFF}} - R_{\text{ON}}$ ,  $\eta$  – эффективная вязкость,  $\zeta(t)$  – случайное напряжение (внешний шум) с гауссовым распределением с полушириной на полувысоте  $\sigma = 0,5$  В.

Эффективную вязкость  $\eta$  для мемристоров, исследованных в эксперименте, оценивали следующим образом. Известно, что время переключения мемристора  $\tau \sim 1/V$  (так называемая дилемма "время – напряжение" [5]), так что скорость изменения сопротивления мемристора в процессе переключения  $\Delta R/\tau \sim V$ . Данное выражение совпадает по форме с законом стационарного движения частицы в вязкой среде:

$$\eta \frac{dx}{dt} = -\frac{\partial W(x)}{\partial x}, \quad (3)$$

где  $x$  – координата частицы,  $W(x)$  – потенциальная энергия. Для мемристоров, изученных в настоящей работе,  $\Delta R \approx 5$  к $\Omega$  и  $\tau \sim 10^{-6}$  с при  $V \sim 5$  В, что даёт оценку  $\eta \sim 10^{-9}$  С.

На рис. 1 представлен пример смоделированной осциллограммы  $R(t)$  (кривая 4) для  $U_0 = 1$  к $\Omega$  В, в котором проявляется СТС с  $f_K \sim 3$  Гц. Полученное значение  $f_K$  согласуется по порядку величины со значениями, наблюдаемыми в эксперименте. На рис. 2 представлен спектр мощности  $S(f)$  моделируемой осциллограммы  $I(t)$  (показан на рис. 1, кривая 3), которая, в свою очередь, рассчитывалась по формуле

$$I(t) = \frac{\zeta(t) + V_{\text{bias}}}{R(t)}, \quad (3)$$

где  $R(t)$  – модельная осциллограмма сопротивления мемристора (рис. 1, кривая 4),  $V_{\text{bias}} = 0,4$  В (значение, используемое в эксперименте). Важно отметить, что один и тот

же массив  $\zeta(t)$  использовался при решении уравнения (1) и при вычислении  $I(t)$ . В этом случае  $\zeta(t)$  и  $R(t)$  полностью коррелированы друг с другом. В противном случае, если бы  $\zeta(t)$  и  $R(t)$  были независимыми, согласно теореме о свертке,  $S(f)$  был бы сверткой спектров  $V(t)$  и  $R(t)$ , которая дает обычный Лоренцев спектр без провалов.

### ***Заключение***

В настоящей работе исследован отклик мемристора на основе стабилизированного иттрием диоксида циркония на внешний случайный сигнал, имитирующий гауссов белый шум. Мемристор переключался между состоянием с низким сопротивлением и состоянием с высоким сопротивлением в режиме случайного телеграфного сигнала. Такое поведение характерно для стохастических бистабильных систем. Спектр мощности тока через мемристор при переключении в режиме случайного телеграфного сигнала проявлялся сериями эквидистантных провалов на частотах Крамера и их гармоник на фоне Лоренцева спада. Этот результат указывает на то, что мемристор резонансно поглощает шумовой сигнал не равномерно по всему спектру, а на определенных частотах, внутренне присущих мемристор. Результаты эксперимента были интерпретированы на основе численного моделирования с использованием модели передемпфированного броуновского движения в бистабильном потенциале. Результаты настоящей работы демонстрируют фундаментальные свойства мемристора как стохастической мультистабильной системы.

### ***Финансирование***

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и общественных системах»). Лабораторные макеты мемристоров для экспериментальных исследований изготовлены в Лаборатории мемристорной наноэлектроники, созданной в рамках Государственного задания FSWR-2022-0009 на создание новых лабораторий для электронной промышленности. Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования центра коллективного пользования – Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского.

- [1] Lee S.H. et al. // Nano Res. 2020. Vol. 13. P. 1228.
- [2] Kramers H.A. // Physica (Utrecht). 1940. Vol. 7. P. 284.
- [3] Wang Z. et al. // Nat. Mater. 2017. Vol. 16. P. 101.
- [4] Filatov D.O. et al. // jSTAT. 2018. P. 124026.
- [5] Menzel S. et al. // Adv. Func. Mater. 2015. P. 6306.

**МНОГОУРОВНЕВЫЕ МЕМРИСТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ A-SI,  
СИНТЕЗИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ**

Д.В. Ичѣткин<sup>1,2,3)</sup>, М.Е. Ширяев<sup>1)</sup>, Д.В. Новиков<sup>1)</sup>,  
Е.А. Лебедев<sup>1)</sup>, В.В. Рыльков<sup>3,4)</sup>

<sup>1)</sup> МИЭТ

<sup>2)</sup> МФТИ

<sup>3)</sup> НИЦ «Курчатовский институт»

<sup>4)</sup> Фрязинский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН

Мемристоры являются перспективными элементами при построении нового типа энергонезависимой резистивной памяти с произвольным доступом типа RRAM и нейроморфных вычислительных систем (НВС), поскольку могут обладать малым энергопотреблением при записи/считывании информации, многоуровневым характером резистивного переключения (РП) и потому способны эмулировать ключевые элементы НВС – синапсы [1-3]. В настоящее время наибольший интерес проявляется к мемристорным структурам типа металл-диэлектрик-металл (МДМ) как к системам, которые могут обладать многоуровневым характером РП при больших временах хранения резистивных состояний, а также довольно технологичны в изготовлении и могут быть легко интегрируемы в современную кремниевую микроэлектронную технологию [1-2]. При этом магнетронное распыление, атомно-слоевое осаждение, разновидности химического осаждения из паровой фазы (PECVD, MOCVD) являются наиболее распространенными методами создания МДМ мемристоров (см. Главы 4-7 в [4]), поскольку позволяют получать качественные диэлектрические и металлические покрытия на большой площади, совместимые с традиционными процессами создания КМОП-микросхем.

Впечатляющие успехи в разработке масштабируемых мемристоров с квазианалоговым характером РП были продемонстрированы в [5], в которой исследовался эффект РП в структурах Cu-Ag/a-Si/p<sup>++</sup>-Si на основе тонких слоев (5 nm) аморфного кремния (a-Si). Наблюдаемые в данной системе многоуровневые РП были объяснены электромиграцией из композитного Ag-Cu электрода подвижных атомов Ag и более подвижных атомов Cu, склонных к образованию силицидов и стабилизирующих образующиеся «сплавные» металлические Ag-Cu наномостики [5]. Однако, продемонстрированная устойчивость к циклам переключения из высокоомного (OFF) в низкоомное состояние (ON) и обратно (или циклам записи/стирания) оказалась невысокой (~100), хотя при квазинепрерывных переходах между состояниями OFF и ON число циклов РП превышало 10<sup>5</sup>. Определенным недостатком структур Cu-Ag/a-Si/p<sup>++</sup>-Si являлись заметные токи ограничения  $I_c$  (потребления) при РП, превышающие 1 mA. Однако, несомненным достоинством разработанных в [5] структур является их бесформовочный характер РП, масштабируемость и возможность создания массива мемристоров в матричном исполнении в плотной кроссбар-архитектуре, совместимой с Si технологией (в [5] продемонстрирована возможность создания пассивных матриц 32x32).

Другой пример реализации больших массивов мемристорных матриц был продемонстрирован на примере структур Au-Ag/i-SiOx/p<sup>++</sup>-Si на основе естественного (собственного) SiOx (далее будем обозначать как i-SiOx) [6]. Оказалось, что i-SiOx толщиной 2-3 nm обладает весьма однородными свойствами, позволившими

продемонстрировать в [6] довольно малую вариативность структур в РП как от цикла к циклу ( $C2C = 1.1\%$ ), так и от устройства к устройству ( $D2D = 2.6\%$ ); была показана также высокая устойчивость структур к РП ( $>5 \cdot 10^5$  циклов). Однако, такие структуры требовали электроформовки (напряжения до 6 В), что является их недостатком при интеграции с современными КМОП микросхемами, работающими при напряжениях  $<3$  В. Кроме того, структуры требовали достаточно большие токи ограничения  $I_c = 1-10$  мА при РП [6].

Один из развиваемых в настоящее время подходов в стабилизации РП структур МДМ связан с введением в их активную область дополнительных слоев (барьерных), препятствующих движению ионов [7]. В данной работе предпринята попытка такой стабилизации в структурах на основе a-Si за счет введения барьерного слоя из i-SiOx между слоем a-Si и подложкой (электродом) p<sup>++</sup>-Si, который дополнительно бы приводил к снижению токов ограничения  $I_c$  при РП.

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) полученных мемристивных структур и эффектов резистивного переключения проводились при комнатной температуре с использованием многофункционального источника-измерителя KEITHLEY 2636B и аналитической зондовой станции SWIN EPS4. ВАХ измерялись в режиме ограничения по току с заземленным нижним электродом структур и увеличением напряжения смещения верхнего электрода по линейно-ступенчатому закону в последовательности от  $0 \rightarrow +6 \rightarrow -6 \rightarrow 0$  В с шагом 0.1 В длительностью ступеньки 50 ms. Количество циклов развертки, амплитуда шага и его длительность задавались программным образом.

Количество возможных состояний РП определялось путем изменения напряжения РП в диапазоне от 3 до 3.5 В при токе ограничения  $I_c = 1$   $\mu$ А. В результате экспериментов было обнаружено 4 стабильных состояния, которые сохранялись более 10 min, что демонстрируется данными на рис. 2. Чтение состояний в этих экспериментах осуществлялось путем подачи на структуру импульсов напряжения амплитудой 0.1 В длительностью 50 ms.

Изучение устойчивости структур к деградации при циклических переключениях (endurance) проводили при последовательной подаче импульсов напряжения длительностью 50 ms:  $U_{set} \rightarrow U_r \rightarrow U_{reset} \rightarrow U_r$ , где  $U_{set} = +2.5$  В – напряжение записи, переводящее структуру в низкоомное состояние,  $U_r = 0.1$  В – напряжение чтения и  $U_{reset} = -2.5$  В – напряжение стирания (reset) или возвращения структуры в исходное состояние. Количество переключений между состояниями  $R_{off}$  и  $R_{on}$  в исследуемой структуре превышает  $10^4$  (см. рис. 3).

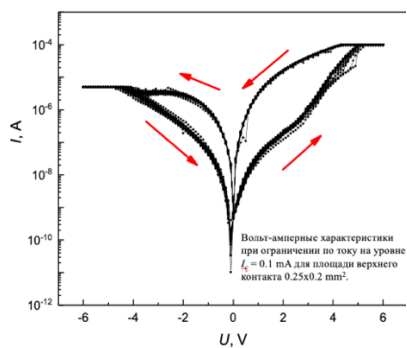


Рис. 1

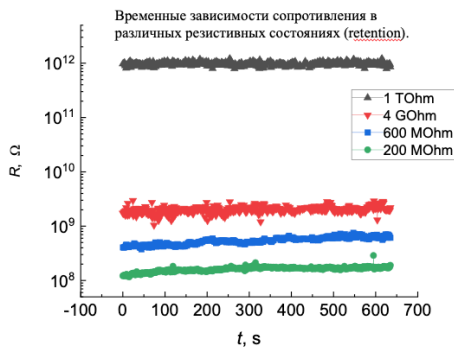


Рис. 2

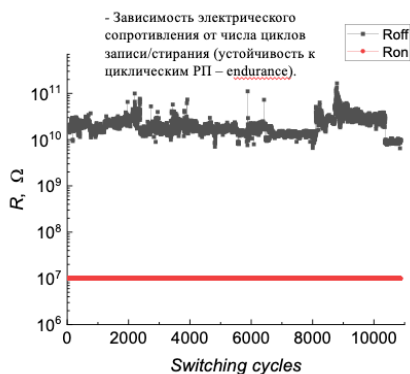


Рис. 3

Схематическое изображение в режиме резистивного переключения в низкоомное состояние  $R_{off}$ . Символы серого цвета иллюстрируют Ag, а красного – Cu. Овалом обозначено место PII.

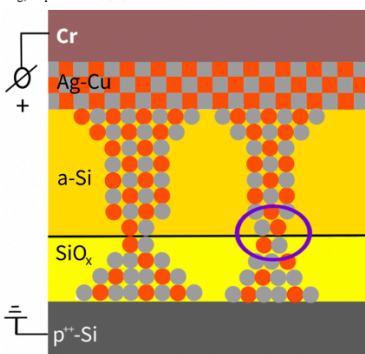


Рис. 4

Обнаруженные стабильные РП структур Cr/Cu-Ag/a-Si/i-SiO<sub>x</sub>/p<sup>++</sup>-Si при относительно малых токах ограничения  $I_c \leq 0.1$  mA мы связываем с тем, что коэффициент диффузии Cu в Si на 2 порядка больше, чем в SiO<sub>2</sub>, тогда как коэффициент диффузии для Ag приблизительно одинаковы [8, 9]. В результате в a-Si согласно модели, предложенной в [10], формируются «утолщенные» электрически прочные сплавные нанопровода Cu-Ag, которые определяют положения областей РП в i-SiO<sub>x</sub>. Именно фиксация областей РП вблизи интерфейса a-Si/i-SiO<sub>x</sub> (рис. 4) и определяет на наш взгляд увеличение устойчивости разработанных структур к РП по аналогии с РП структур на основе наноконфигураций в режиме многофиламентного переключения [10]. Важно также, что в рассмотренном случае существенно снижаются токи ограничения при РП.



### **Выводы**

В работе синтезированы структуры Cr/Cu-Ag/a-Si/i-SiO<sub>x</sub>/p<sup>++</sup>-Si на основе аморфного кремния и естественного его оксида с использованием технологий магнетронного осаждения и термического напыления, которые обладают стабильными многоуровневыми резистивными переключениями при более чем на порядок меньших токах потребления, чем в структурах на основе a-Si [5] или i-SiO<sub>x</sub> [6]. Полученные результаты демонстрируют обнадеживающие перспективы использования разработанной мемри-стивной структуры при создании энергоэффективных нейроморфных вычислительных систем и могут способствовать дальнейшему развитию разработанной технологии.

### **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00171), а также госзадания НИЦ «Курчатовский институт» (структурные исследования образцов).

- [1] Emelyanov A.V., Nikiruy K.E., Serenko A.V., Sitnikov A.V., Presnyakov M.Yu., Rybka R.B., Sboev A.G., Rylkov V.V., Kashkarov P.K., Kovalchuk M.V., Demin V.A. // *Nanotechnology*. 2020. Vol. 31. P. 045201.
- [2] Demin V.A., Nekhaev D.V., Surazhevsky I.A., Nikiruy K.E., Emelyanov A.V., Nikolaev S.N., Rylkov V.V., Kovalchuk M.V. // *Neural Networks*. 2021. Vol. 134. P. 64.
- [3] Matsukatova A.N., Ilyasov A.I., Nikiruy K.E., Kukueva E.V., Vasiliev A.L., Goncharov B.V., Sitnikov A.V., Zanaevskina M.L., Bugaev A.S., Demin V.A., Rylkov V.V., Emelyanov A.V. // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. P. 3455.
- [4] Valov I., Dimitrakis P., Tappertzhofen S. (Eds.) // *Metal Oxides for Non-Volatile Memories: Materials, Technology and Applications*. Elsevier, 2022. P. 536. ISBN: 978-0-12-814629-3
- [5] Yeon H., Lin P., Choi C., Tan S.H., Park Y., Lee D., Lee J., Xu F., Gao B., Wu H., Qian H., Nie Y., Kim S., Kim J. // *Nat. Nanotechnol.* 2020. Vol. 15. P. 574.
- [6] Ma Z., Ge J., Chen W., Cao X., Diao S., Liu Z., Pan S. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2022. Vol. 14. P. 21207.
- [7] Banerjee W., Liu Q., Hwang H. // *J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 127. P. 051101.
- [8] McBrayer J.D., Swanson R.M., Sigmon T.W. // *J. Electrochem. Soc.* 1986. Vol. 133. P. 1242.
- [9] Jassim M.M., Hussain A.O. // *Iraqi Journal of Applied Physics*. 2021. Vol. 17. P. 21.
- [10] Martyshev M.N., Emelyanov A.V., Demin V.A., Nikiruy K.E., Minnekhanov A.A., Nikolaev S.N., Taldenkov A.N., Ovcharov A.V., Presnyakov M.Yu., Sitnikov A.V., Vasiliev A.L., Forsh P.A., Granovskiy A.B., Kashkarov P.K., Kovalchuk M.V., Rylkov V.V. // *Phys. Rev. Applied*. 2020. Vol. 14. P. 034016.

## ДИНАМИКА СИСТЕМЫ ФИТЦХЬЮ – НАГУМО С ИНТЕГРАЦИЕЙ МЕМРИСТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.М. Кипелкин

*ННГУ им. Н.И. Лобачевского*

В настоящее время отмечается значительный прогресс в развитии структур и материалов, основанных на эффекте резистивного переключения (РП). Одним из примеров таких структур является мемристор – наноструктурный резистор с памятью, изменяющий свою проводимость под воздействием электрического заряда [1]. Особое внимание здесь сосредоточено на структурах типа «металл-изолятор-металл», обладающих гистерезисной вольт-амперной характеристикой, что свидетельствует о возможности использования таких структур в качестве элементов для проектирования спайковых нейронных сетей (SNN) [2]. Исследования показывают, что мемристоры не только способны эффективно воспроизводить ключевые функции биологических нейронов и синапсов [3], включая синаптическую пластичность, но и также идеально подходят для имитации динамики ионных каналов в нейронах. Для моделей нейронов, описывающих ионные каналы, обработка и кодирование информации может быть описана динамикой потенциала действия. Однако из-за характерной стохастичности и чувствительности мемристоров к пороговому напряжению, влияющим на динамические процессы, необходимо провести более глубокие теоретические исследования, позволяющие управлять поведением устройств и предотвращать нежелательные эффекты за счёт оперативного управления.

На основании вышеперечисленных источников и существующих проблем в данной работе представлена математическая реализация нейрона на основе интеграции мемристивных материалов Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti и Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti в систему Фитцхью – Нагумо для имитации ионных каналов. Показано, что модель воспроизводит качественное совпадение основных характеристик и свойств потенциала действия. Кроме того, при изучении временной области было проиллюстрировано, что модель не только способна воспроизводить бистабильную динамику, но и при определенных параметрах проявляет поведение, похожее на типичную для реальных нейронов пачечную (бёрстовую) активность с заданным количеством импульсов в пачке.

Динамика нейронной активности в данной работе определялась редуцированной моделью нейронов Фитцхью – Нагумо (ФХН). Эта модель основывается на предположении, что ионные токи, связанные с проведением нервных импульсов, могут быть разделены на быстро и медленно действующие компоненты, отвечающие за генерацию спайка и восстановления покоя мембраны соответственно. Математическое описание модели вводится на основании закона Кирхгофа. Действие ионных каналов в классической модели ФХН описывается полиномом третьей степени. В представленной работе полином третьей степени заменен мемристивной нелинейностью, экспериментально полученной в результате исследования структур Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti и Au/Ta/ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/Pt/Ti. Таким образом, мемристоры в работе имитируют ионные каналы нейрона.

Для создания мемристивных структур на стеклянной подложке использовалась вакуумная система для осаждения тонких пленок Torr International® 2G1-1G2-EB4-TH1, а также стандартное оборудование для фотолитографии. Пленка ZrO<sub>2</sub>(Y) нанесена

методом высокочастотного магнетронного распыления мишени, спрессованной из смеси порошков  $ZrO_2$  (88% мол.) и  $Y_2O_3$  (12% мол.). Определение электрических характеристик в непрерывном и импульсном режимах проводилось с помощью анализатора полупроводниковых приборов Agilent B1500A со скоростью сканирования 7.25 В/с. Математическая модель мемристивных устройств представляет из себя множества сложных функций, основываясь на процессах потенцирования и депрессии. Данные процессы используют различные длительности импульсов и амплитуды стимуляции для подтверждения регулируемой проводимости мемристора.

В результате исследования, показано, что модель демонстрирует качественное совпадение основных характеристик и свойств потенциала действия, включая: существование порогового значения деполяризующего потенциала, выполнение закона «Все или ничего», а также наличие периодов рефрактерности, включая абсолютную и относительную рефрактерность. В дополнение к этому, величиной внешнего напряжения можно регулировать один из трех основных динамических режимов – возбудимый, бистабильный и колебательный. Было замечено, что путем подбора параметров модель качественно демонстрирует поведение, похожее на типичную для реальных нейронов пачечную (бёрстовую) активность с разным количеством импульсов в пачке (от 2 до 8 штук), при продолжительном внешнем прямоугольном воздействии. С математической точки зрения такую активность называют условной, так как повторяющиеся пачки возникают только при определенных значениях параметров системы. Помимо имитации ионной динамики, использование встречно-параллельного соединения двух мемристивных структур может демонстрировать механизм синаптической потенциации.

Благодаря ионным механизмам мемристивных структур возможно точное воссоздание множества биологических процессов и функций, которые имеют решающее значение для процессов обучения и памяти. Это открывает новые перспективы в области разработки аппаратных средств для биоэлектронных интерфейсов, способных получать и классифицировать нейрональную активность в режиме реального времени [4], что имеет важное значение для исследований свойств нервной системы.

- [1] Chua L. // Memristor-the missing circuit element. IEEE Transactions on circuit theory. 1971. Vol. 18. P. 507.
- [2] Sun K., Chen J., Yan X. // The future of memristors: Materials engineering and neural networks. Advanced Functional Materials. 2021. Vol. 31. P. 2006773.
- [3] Kipelkin I.M. // Synchronization of memristive neuronal oscillators. Journal of Radio electronics. 2024. №. 4.
- [4] Wu Z. // A habituation sensory nervous system with memristors. Advanced Materials. 2020. Vol. 32. P. 2004398.

## ТЕСТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ШУМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕМРИСТОРНЫХ СИСТЕМ

А.В. Клюев, А.В. Якимов

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Приводятся результаты тестирования генераторов белого гауссова шума, встроенных в комплексный анализатор ADSViewer2 [1]. Эти генераторы используются для исследования влияния шума на поведение стохастических мультистабильных систем, на основе которых может быть описана работа мемристоров [2, 3].

### Характеристики генераторов

Тестировались три генератора целочисленных псевдослучайных последовательностей  $N_i$ ,  $i = [1, N_{\text{tot}}]$ : (LV) – виртуальный генератор LabVIEW; (N16) – суперпозиция 16 равномерно распределённых случайных величин; (NL) – нелинейное преобразование отсчётов генератора равномерно распределённых случайных величин.

Генерировались последовательности, содержащие  $N_{\text{tot}} = 10^6$  псевдослучайных отсчётов  $N$  со средним значением  $\langle N \rangle = 0$  и стандартом  $\sigma_N = 2^{11} = 2048$ . Частота генерации отсчётов условно принята равной  $f_s = 3$  кГц. Анализировались осциллограммы, гистограммы (с расчётом первых четырёх кумулянтов), спектры и биспектры. Для этого использовались встроенные функции анализатора [1].

При анализе осциллограммы использовались два режима просмотра: вся осциллограмма,  $i = [1, N_{\text{tot}}]$ ; пошаговый просмотр по 1000 точек. Этот анализ носит чисто вспомогательный характер.

### Анализ гистограммы

Гистограмма является оценкой функции плотности вероятностей  $W(N)$ . Она представлена на рис. 1. Все полученные отсчёты  $N$  сортируются в 50 равных интервалов. Число этих интервалов, в соответствии с удобством дальнейшего анализа, может быть произвольно изменено.

На рис. 1 верхняя (чёрная) кривая соответствует генератору LV; следующая (синяя) кривая – N16; нижняя (красная) – NL.

Проверялось выполнение условия нормировки. Вычислялись оценки следующих параметров: среднее  $\langle N \rangle$ ; стандарт  $\sigma_N$ ; коэффициенты асимметрии  $\gamma_3$  и эксцесса  $\gamma_4$ . Эти оценки приведены в таблице ниже.

Оценки среднего оказались ближе всего к заданному нулевому значению для генераторов N16 и NL (около  $\pm 1$ ); для генератора LV имеем  $\langle N \rangle \approx 5$ . Оценки стандарта для всех трёх генераторов совпадают, с удовлетворительной точностью, с заданным значением,  $\sigma_N \approx 2048$ . Оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса являются мерой

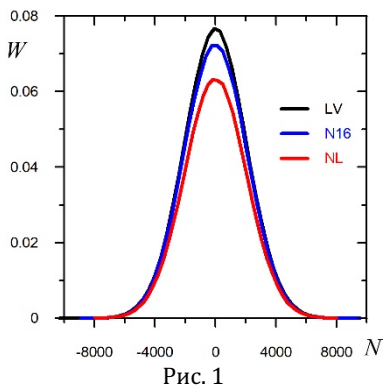


Рис. 1

отклонения от закона Гаусса, для которого они должны быть равны нулю. Минимальные значения этих оценок получены для генератора LV, не более  $10^{-5}$ ; для двух других генераторов имеем (по модулю) примерно от  $10^{-3}$  до 0.1.

### Анализ спектра и биспектра

Для оценки спектров  $S(f)$  использовалось 1024-точечное быстрое преобразование Фурье (БПФ). При выбранной длине генерируемых псевдослучайных последовательностей это даёт 976 усредняемых спектрограмм. Теоретическая погрешность оценки каждого (из трёх) спектра составляет 3.2 процента.

Обнаружилось, что (в пределах экспериментальной погрешности  $\sigma_S$ ) оценки спектров не зависят от частоты анализа,  $S(f) = S_0$ , см. рис. 2. Значения оценок  $S_0$ , а также их погрешностей  $\sigma_S$  приведены в таблице.

Следует учесть, что анализировались целочисленные последовательности с условной частотой дискретизации  $f_s$ . В экспериментальных приложениях величина спектра и доступный диапазон анализируемых частот определяются используемым цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) и последующим за ним усилителем.

Биспектр является комплексной функцией двух частот,  $B = B(f_1, f_2)$ . Он определяется двумерным преобразованием Фурье от третьей кумулянтной функции исследуемого процесса, см., например, [4].

Для гауссова случайного процесса биспектр равен нулю,  $B = 0$ . Таким образом, так же как оценка коэффициентов асимметрии  $\gamma_3$  и эксцесса  $\gamma_4$ , оценка биспектра может служить мерой негауссовости генерируемых псевдослучайных последовательностей.

Для оценки биспектра использовалось двойное БПФ, по 512 точек для каждой переменной. Здесь приводятся результаты для модуля биспектора,  $B_s = |B(f, f)|$ , полученные для трёх анализируемых последовательностей, см. рис. 3 и таблицу. Обнаружилось, что на биспекторе, в пределах экспериментальной погрешности  $\sigma_B$ , модуль биспектра не зависит от частоты анализа  $f$ . Более того, в пределах 95-процентного доверительного интервала, составляющего  $3\sigma_B$ , величины биспектров можно считать равными нулю, что соответствует гипотезе о гауссовости генерируемых последовательностей.

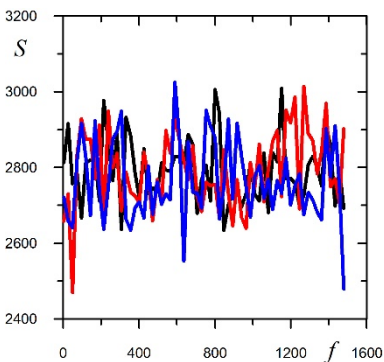


Рис. 2

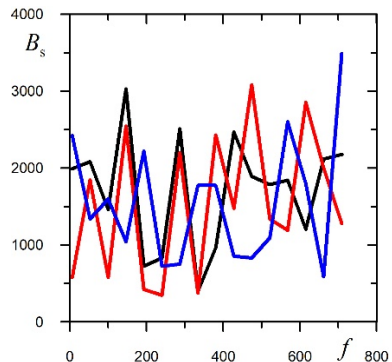


Рис. 3

**Обсуждение и выводы**

Сводка полученных результатов приводится в таблице ниже.

Табл.

Генератор:	LV	N16	NL
Среднее $\langle N \rangle$	4.7	-1.2	1.3
Стандарт $\sigma_N$	2048	2048	2048
Асимметрия $\gamma_3$	$5 \times 10^{-4}$	$-3 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$
Экссесс $\gamma_4$	$10^{-3}$	$-8 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$
Спектр $S_0$	2800	2800	2800
Погрешность $\sigma_S$	90	100	90
Бисектор $B_s$	1540	1570	1430
Погрешность $\sigma_B$	49 %	52 %	54 %

Из таблицы видно, что все три генератора могут использоваться для исследования влияния белого гауссова шума на поведение стохастических мультистабильных систем. Однако требуются дополнительные комментарии по преобразованию генерируемых целочисленных псевдослучайных последовательностей в аналоговый шум, используемый в экспериментах с применением ЦАП, см., например, [5]. Надо определиться с характеристиками ЦАП, подающего аналоговый шум на вход системы.

Принимаем во внимание разрядность ЦАП ( $M_{DAC}$ , в битах), а также допустимый диапазон отсчётов  $N_{max} = 2^{M_{DAC}}$ . Этот диапазон должен быть достаточно большим по сравнению с  $\sigma_N$ .

Вводим так называемый «запас разрядности ЦАП»,  $K_{DAC} = N_{max} / 2\sigma_N$ .

Пусть  $K_{DAC} = 2$ , то есть диапазон ЦАП в два раза больше, чем  $2\sigma_N$ . В этом случае около 4.6 процентов исходного шума приведёт к переполнению ЦАП. Увеличение до  $K_{DAC} = 3$  приведёт к переполнению ЦАП в случае 0.26 процентов (при генерации 1 млн. отсчётов примерно 2600 из них будут приводить к переполнению ЦАП). Если этот результат считается неприемлемым, можно использовать  $K_{DAC} = 8$ , то есть 16-разрядный ЦАП. При  $\sigma_N = 2^{11} = 2048$  переполнения ЦАП практически не будет.

**Заключение**

Приведены результаты тестирования генераторов белого гауссова шума, встроенных в комплексный анализатор ADSViewer2 v0.15 [1], используемых для исследования влияния шума на поведение стохастических мультистабильных систем, на основе которых может быть описана работа мемристоров [2, 3].

Определено значение стандарта шума, предельно допустимое для дальнейшего использования в ЦАП.

Даны рекомендации по использованию указанных генераторов для исследования стохастических мультистабильных мемристормых систем.

Настоящая работа поддержана следующими проектами.

Комплексное исследование флуктуационных явлений в мультистабильных системах для создания новых поколений электронных устройств и нейроморфных технологий искусственного интеллекта на основе мемристивных материалов (Грант

Правительства Российской Федерации от 21 мая 2018 г. № 074 02 2018 330). № темы: Н-334-21. Руководитель: Спаньоло Б. (2018–2020 гг.).

Комплексное исследование флуктуационных явлений в мультистабильных системах для создания новых поколений электронных устройств и нейроморфных технологий искусственного интеллекта на основе мемристивных материалов (Соглашение между Минобрнауки РФ и ННГУ о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации, г. Москва, 10 июня 2021 г. № 075 15 2021 640). № темы: Н-334-21. Руководитель: Спаньоло Б. (2021 г.).

Решаемые задачи связаны с работами, выполняемыми при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Программа стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», Стратегический проект «Фундаментальные основы технологий будущего», задача 2.

- [1] Андронов А.А., Беляков А.В., Гурьев В.А., Якимов А.В. // В кн.: Тр. 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Полупроводники, Апрель 2002 г. / Ред. А.В. Якимов. – Н. Новгород: ТАЛИАМ, 2002. С. 38. (English abstract: P. 45). [http://old.rf.unn.ru/NATO/2ws/SfP2\\_Andronov.pdf](http://old.rf.unn.ru/NATO/2ws/SfP2_Andronov.pdf).
- [2] Filatov D.O., Novikov A.S., Baranova V.N., Antonov D.A., Kruglov A.V., Antonov I.N., Zdoroveyshchev A.V., Koryazhkina M.N., Gorshkov O.N., Dubkov A.A., Carollo A., Spagnolo B. // *J. of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2020. Vol. 2020. P. 024005. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/ab69ff>.
- [3] Mikhaylov A.N., Guseinov D.V., Belov A.I., Korolev D.S., Shishmakova V.A., Koryazhkina M.N., Filatov D.O., Gorshkov O.N., Maldonado D., Alonso F.J., Roldán J.B., Krichigin A.V., Agudov N.V., Dubkov A.A., Carollo A., Spagnolo B. // *Chaos, Solitons and Fractals*. 2021. Vol. 144. P. 110723. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110723>.
- [4] Yakimov A.V., Belyakov A.V., Perov M.Yu., Vandamme L.K.J. // *Proc. SPIE*. Vol. 5115 *Noise and Information in Nanoelectronics, Sensors, and Standards*, edited by Laszlo B. Kish, Frederick Green, Giuseppe Iannaccone, John R. Vig, (SPIE, Bellingham, WA, 2003). P. 40. DOI: 10.1117/12.499828.
- [5] Беляков А.В., Якимов А.В. // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2002. Т. 45, №. 6. С. 533. – Belyakov A.V., Yakimov A.V. // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2002. Vol. 45, No. 6. P. 487. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1019972803508>.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ *IN VITRO* НЕЙРОНАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ГИППОКАМПА МОЗГА ЛАБОРАТОРНЫХ МЫШЕЙ НА ОТКЛИК МЕМРИСТИВНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ $ZrO_2(Y)$

М.Н. Коряжкина<sup>1)</sup>, А.В. Лебедева<sup>1)</sup>, И.Н. Антонов<sup>1)</sup>, А.В. Бельтюкова<sup>1)</sup>,  
Д.Д. Пахомова<sup>1)</sup>, Е.Д. Будылина<sup>1)</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1)</sup>, Б. Спаньоло<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского

<sup>2)</sup> Университет Палермо

Эпилепсия является одним из наиболее распространенных нейродегенеративных заболеваний [1]. Считается, что такие заболевания напрямую связаны со специфическими аномалиями динамики нейрональной активности [2]. В перспективе эти аномалии могут быть подавлены при помощи, например, нейропротезирования. Стоит отметить, что нейрональная активность является сигналом аналогового типа, поэтому для обработки таких сигналов современные нейропротезы реализуют на основе множества элементов классической электронной компонентной базы, что приводит к усложнению схемотехнических решений, уменьшению энергоэффективности, увеличению размеров и удорожанию конечного устройства.

Благодаря естественной возможности аналогового изменения проводимости (или резистивного состояния) нового элемента электронной компонентной базы – мемристорного устройства, его рассматривают как основной строительный блок нового поколения нейроморфных систем, способных имитировать функции нейронов и синапсов. В настоящее время активно изучаются возможности и способы использования мемристорных устройств в качестве электронных синапсов в нейропротезах нового поколения [3].

Данная работа посвящена результатам исследования влияния параметров нейрональной активности на отклик мемристорного устройства на основе стека  $Ta/ZrO_2(Y)/Pt$  в форме изменения его резистивного состояния. Детальную информацию о технологии изготовления мемристорного устройства и схематическое изображение экспериментальной установки можно найти в [4]. Исследования были реализованы при помощи зондовой станции Everbeing EB-6, анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A и многофункционального устройства ввода-вывода National Instruments USB-6361.

Регистрация нейрональной активности в срезах гиппокампа мозга лабораторных мышей (*in vitro*) без патологий осуществлялась путем одноканальной регистрации с помощью пэтч-микроэлектродов, оптического микроскопа Scientifica и усилителя биосигналов НЕКА ЕРС10. Нейрональная активность *in vitro* представляла собой вызванные электрическим стимулом локальные полевые потенциалы. В качестве параметров нейрональной активности были выбраны такие величины, как амплитуда и частота генерации локальных полевых потенциалов.

С целью выполнения вышеуказанного исследования на мемристорное устройство циклически подавался управляющий сигнал, состоящий из одного переключающего в состояние с высоким/низким сопротивлением импульса положительной/отрицательной полярности и серии из 100 импульсов, каждый из которых представлял собой нейрональную активность отрицательной/положительной полярности с фиксированной амплитудой  $A$ . Чтение резистивного состояния осуществлялось после каждого



импульса. Схематическое изображение одного цикла управляющего сигнала с нейрональной активностью разной полярности показано на рис. 1 и 2. Выбранный диапазон величины  $A$  покрывал диапазон напряжений, при которых реализуются изменения резистивного состояния на вольтамперных характеристиках мемристивного устройства (рис. 3). Частота генерации нейрональной активности была выбрана в соответствии с частотой, при которой в живых системах реализуются долговременная потенция (усиление эффективности передачи информации между двумя нейронами в результате внешнего воздействия) или долговременная депрессия (наоборот, ослабление этой эффективности) [5].

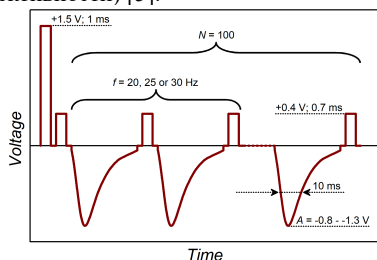


Рис. 1

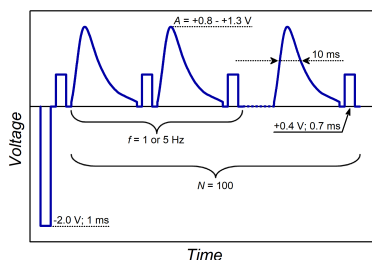


Рис. 2

Исследованное мемристивное устройство демонстрировало высокую стабильность основных параметров резистивного переключения (таких как токи в разных резистивных состояниях и напряжения резистивного переключения) и выносливость к многократному резистивному переключению, достаточные для выполнения вышеуказанного исследования, о чем свидетельствуют результаты предварительной характеристики устройства, приведенные на рис. 3 и 4. На рис. 3 приведены 100 вольтамперных характеристик (серым) мемристивного устройства и усредненная вольтамперная характеристика (черным). На рис. 4 приведены результаты исследования выносливости мемристивного устройства к многократному резистивному переключению, а именно, зависимости тока через мемристивное устройство при чтении в состоянии с высоким и низким сопротивлением.

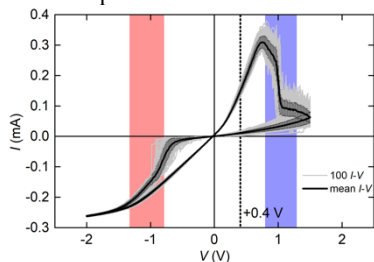


Рис. 3

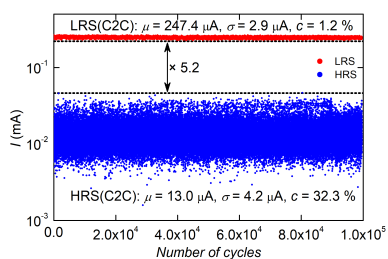


Рис. 4

На рис. 5 и 6 приведены усредненные (от цикла к циклу приложения управляющего сигнала) зависимости тока через мемристивное устройство при чтении от количества чтений в исследованиях с нейрональной активностью разной амплитуды. Данные,

приведенные на рис. 5, получены при использовании нейрональной активности отрицательной полярности с частотой 30 Гц, а на рис. 6 – при использовании нейрональной активности положительной полярности с частотой 5 Гц. Показано, что при каждом последующем приложении импульса нейрональной активности с отрицательной полярностью происходит плавное увеличение тока через мемристивное устройство, интерпретируемое как долговременная потенциация в живых системах. Причем при малых  $A$  ( $-0,8$  и  $-0,9$  В) увеличение тока происходит более плавно.

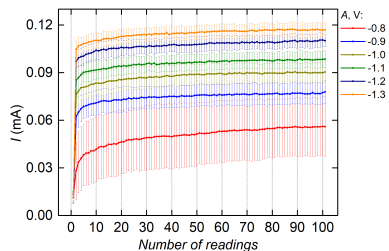


Рис. 5

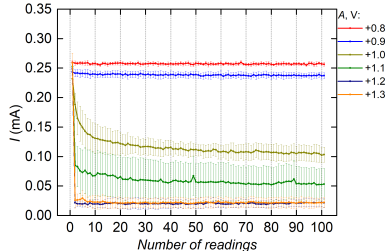


Рис. 6

В то же время, при малых  $A$  нейрональной активности положительной полярности ( $+0,8$  и  $+0,9$  В) мемристивное устройство вообще не изменяет своего резистивного состояния. Увеличение  $A$  до  $+1,0$  и  $+1,1$  В приводит к плавному уменьшению тока через мемристивное устройство с каждым последующим приложением нейрональной активности, то есть реализации процесса, интерпретируемого как долговременная депрессия в живых системах. Дальнейшее увеличение  $A$  до  $+1,2$  и  $+1,3$  В приводит к переключению мемристивного устройства в состояние с высоким сопротивлением или близкое к нему.

На рис. 7 – 9 приведены усредненные (от цикла к циклу приложения управляющего сигнала) токовые отклики мемристивного устройства на конкретный в серии импульс нейрональной активности отрицательной полярности с частотой 30 Гц и разной амплитудой:  $-0,8$  (рис. 7),  $-0,9$  (рис. 8) и  $-1,3$  (рис. 9) В.

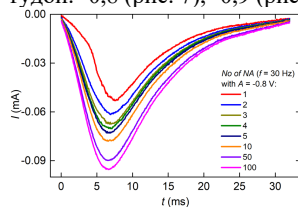


Рис. 7

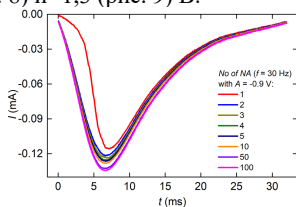


Рис. 8

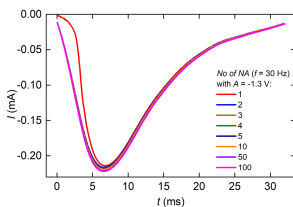


Рис. 9

Показано, что токовый отклик на первый импульс нейрональной активности сильно выделяется на фоне последующих импульсов – он имеет искаженную форму слева. Это может свидетельствовать о доминирующем вкладе переднего фронта первого импульса нейрональной активности отрицательной полярности в изменение резистивного состояния к более проводящему.

На рис. 10 – 12 приведены усредненные (от цикла к циклу приложения управляющего сигнала) токовые отклики мемристорного устройства на конкретный в серии импульс нейрональной активности положительной полярности с частотой 5 Гц и разной амплитудой: +1,0 (рис. 10), +1,1 (рис. 11) и +1,2 (рис. 12) В.

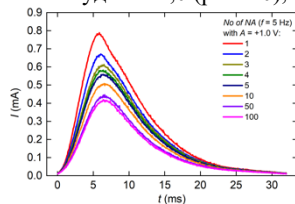


Рис. 10

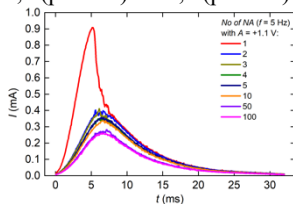


Рис. 11

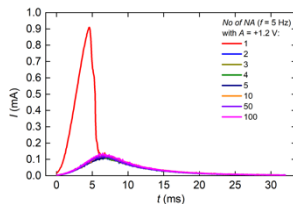


Рис. 12

Показано, что токовый отклик на первый импульс нейрональной активности имеет искаженную форму справа. Это может свидетельствовать о доминирующем вкладе заднего фронта импульса нейрональной активности положительной полярности в изменение резистивного состояния к менее проводящему. В то же время, в отличие от предыдущего случая нейрональной активности отрицательной полярности, в зависимости от величины  $A$  искажения формы могут быть обнаружены и на кривых токового отклика на второй и последующие импульсы.

Следует отметить, что существенной зависимости токового отклика мемристорного устройства и его резистивного состояния от частоты нейрональной активности в исследуемом в данной работе диапазоне частот не было обнаружено.

Таким образом, представленные в данной работе исследования демонстрируют возможность управления резистивными состояниями мемристорных устройств с использованием нейрональной активности, записанной в срезах гиппокампа мозга лабораторных мышей (*in vitro*) без патологий. Показано, что в исследованном мемристорном устройстве могут быть реализованы долговременные потенциация и депрессия при приложении импульсов нейрональной активности. Разработка физической модели обнаруженного эффекта будет предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-21-00440). Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования – Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

- [1] Beghi E. // Neuroepidemiology. 2020. Vol. 54. P. 185.
- [2] Gorur-Shandilya S., Cronin E.M., Schneider A.C. et al. // eLife. 2022. Vol. 11. P. e76579.
- [3] Huang W., Xia X., Zhu C. et al. // Nano-Micro Letters. 2021. Vol. 13. P. 85.
- [4] Koryazhkina M.N., Filatov D.O., Shishmakova V.A. et al. // Chaos, Solitons & Fractals. 2022. Vol. 162. P. 112459.
- [5] Rachmuth G., Shouval H.Z., Bear M.F. et al. // Proceedings of the national academy of sciences. 2011. Vol. 108. P. E1266.

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФОРМОВКИ И РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ДВУХСЛОЙНОГО ДИЭЛЕКТРИКА $Al_2O_3/ZrO_2(Y)$

А.В. Круглов, Д.А. Серов, А.И. Белов, М.Н. Коряжкина, И.Н. Антонов,  
С.Ю. Зубков, Р.Н. Крюков, А.Н. Михайлов, Д.О. Филатов, О.Н. Горшков

*ННГУ им. Н.И. Лобачевского*

Разработка мемристорных структур для применения их в качестве элементов энергонезависимой резистивной памяти является одной из наиболее актуальных научно-технических задач.

Работа направлена на решение проблемы нестабильности основных параметров резистивного переключения мемристоров, а также на создание «бесформовочных» устройств, что актуально для их КМОП интеграции.

### ***Введение***

Для успешной интеграции мемристоров [1] в существующую КМОП-технологии необходимо обеспечить совместимость используемых материалов и рабочих параметров мемристорных устройств с параметрами управляющих элементов и схем КМОП. В частности, накладываются ограничения на максимальные протекающие через мемристорную структуру токи и прикладываемые напряжения.

Однако, для большинства мемристорных структур для начала резистивных переключений (РП) требуется проведение электроформовки (ЭФ): приложение достаточно большого электрического напряжения ( $V_{FORM}$ ), в результате чего структура из исходного состояния с высоким сопротивлением ( $R_0$ ) переключается в состояние с низким сопротивлением. Именно в процессе ЭФ через всю толщину изолирующего слоя формируется проводящая нить (филамент), которая в случае оксидных диэлектриков состоит из вакансий кислорода.

Важной задачей для практического использования мемристоров является необходимость снижения напряжения ЭФ, а в идеале – создание мемристорных устройств, которые демонстрируют РП без ЭФ [2].

Еще одной из наиболее серьезных проблем мемристорной электроники, которая ограничивает широкое практическое внедрение, является низкая воспроизводимость от цикла к циклу ключевых параметров мемристоров (рабочих токов и напряжений переключения), а также их деградация в процессе эксплуатации.

Ранее в большом числе работ, например [3], было показано, что одним из способов стабилизации параметров РП мемристоров и улучшения их характеристик является применение в качестве рабочего оксида двухслойных (многослойных) структур. Наибольшее количество исследований было выполнено на комбинации материалов  $Al_2O_3/HfO_2$  [4, 5], однако однозначное влияние толщины и положения изолирующего слоя  $Al_2O_3$  так и не установлено, так же рознится и интерпретация полученных результатов.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование влияния дополнительного изолирующего слоя  $Al_2O_3$  и его толщины (0, 3, 6 и 9 нм) на параметры ЭФ и РП мемристоров на основе двухслойного диэлектрика  $Al_2O_3/ZrO_2(12.5 \text{ мол.} \% Y_2O_3)$ . Выбор стабилизированного иттрием диоксида циркония (YSZ) в качестве

функционального слоя мемристорной структуры связан с благоприятными условиями для реализации РП в этом материале: высокой подвижностью ионов кислорода [6], а также возможностью управления концентрацией вакансий кислорода путём изменения количества стабилизирующей добавки  $Y_2O_3$ . Известно [7], что в оксидных диэлектриках, в которых РП реализуется по механизму изменения валентности, в процессе циклических переключений происходит активный обмен ионами кислорода между резистивным слоем и активным электродом. Добавление между ними дополнительного тонкого изолирующего слоя  $Al_2O_3$  является одним из способов управления таким обменом, т.е. способом влиять на параметры РП двухслойных мемристорных структур.

### ***Материалы и методы исследования***

Объекты для исследования представляли собой структуры Pt(20 nm)/Ta(40 nm)/ $Al_2O_3$ (0, 3, 6, 9 nm)/YSZ(20 nm)/Pt(40 nm)/Ti(10 nm)/Substrate, сформированные методом магнетронного осаждения с использованием установки Torr International 2G1-1G2-EB4-TN1. Для электрических измерений верхние активные электроды (Ta) с защитным слоем (Pt) формировались через теневую маску с отверстиями диаметром 0.4 мкм. Для исследований методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) были изготовлены структуры со сплошными слоями верхнего электрода и защитного слоя.

Измерение электрических характеристик структур выполнялось с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A с использованием зондовой станции EverBeing EB-6. Знак напряжения на структурах соответствовал потенциалу верхнего электрода (Ta) относительно потенциала нижнего электрода (Pt).

Фазовый анализ при послойном профилировании мемристорных структур проводился методом РФЭС с использованием комплекса Multiprobe RM (Omicron Nanotechnology GmbH, Германия), аналогично работе [8].

### ***Результаты и обсуждение***

Результаты электрических измерений показали, что все мемристоры с толщиной дополнительного изолирующего слоя  $Al_2O_3$ , равной 0 и 3 нм, изначально находились в проводящем состоянии. Типичные кривые первого цикла ВАХ структур Ta/YSZ/Pt, для которых до начала РП проводилась антиформовка (путем подачи отрицательного напряжения), показаны на рис. 1. Для структур с  $Al_2O_3$  толщиной 6 и 9 нм около половины исследованных мемристоров изначально так же находились в проводящем состоянии, тогда как 50% – в непроводящем состоянии и требовали проведения обычной ЭФ путем приложения положительного напряжения (рис. 2).

Интересно отметить, что оба типа структур, изначально находящиеся в различных резистивных состояниях и прошедшие процедуры антиформовки и ЭФ, не демонстрировали при последующих измерениях существенных различий в величинах токов и напряжениях переключения.

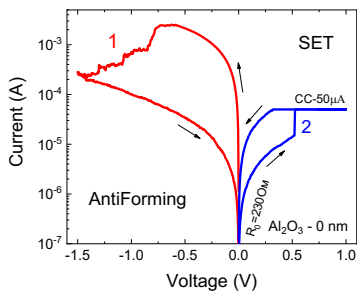


Рис. 1

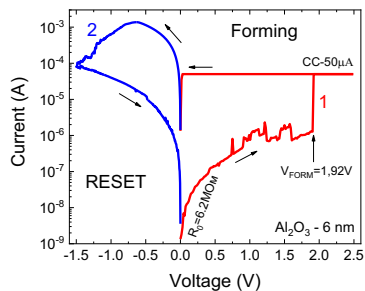


Рис. 2

Результаты исследований методом РФЭС элементного состава структур Ta/YSZ/Pt и Ta/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(6 nm)/YSZ/Pt непосредственно после формирования показаны на рис. 3 и 4. Верхний электрод (Ta) обеих структур окислен, из характера профиля распределения кислорода видно, что кислород проник в слой Ta не с поверхности, а из слоя YSZ в процессе роста. В структуре, содержащей слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, количество атомов кислорода в электроде Ta почти в 3 раза меньше, что указывает на ограничение диффузии атомов кислорода в электрод Ta слоем Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Результаты химического анализа показали наличие в слое Ta элементного Ta<sup>0</sup> и соединений TaO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

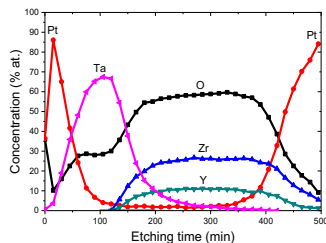


Рис. 3

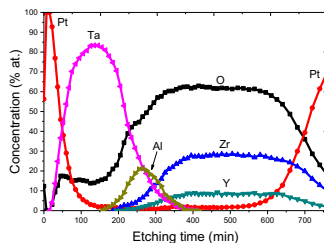


Рис. 4

Исходя из результатов РФЭС исследований, изначальное проводящее состояние структур может быть объяснено следующим образом. Диффузия кислорода из YSZ в электрод Ta и его частичное окисление до TaO<sub>x</sub> в процессе осаждения способствуют увеличению концентрации кислородных вакансий в слое функционального диэлектрика YSZ до значений, достаточных для образования проводящих каналов в исходных мемристорных структурах. Приложение в процессе антиформовки отрицательного напряжения на электрод Ta приводит к дрейфу ионов кислорода из слоя TaO<sub>x</sub> в слой YSZ, где они рекомбинируют с кислородными вакансиями, повышая сопротивление мемристорной структуры и переводя ее в состояние с высоким сопротивлением. При последующей развертке положительного напряжения на электрод Ta, начинается процесс формирования филамента, что переводит структуру в состояние с низким сопротивлением, т.е. реализуется процесс SET (рис. 1).

Слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 3 нм является диффузионно-прозрачным или несплошным и не препятствует окислению активного электрода. При большей толщине слоя исходное

непроводящее состояние структур объясняется блокировкой диффузии кислорода в электрод Та слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , что не приводит к существенному изменению концентрации вакансий в слое функционального диэлектрика YSZ. Исходно проводящее состояние в двухслойных мемристорных структурах с толщинами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  6 и 9 нм, предположительно, обусловлено локальными участками неоднородности толщины пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  из-за неровностей верхней границы поликристаллической плёнки YSZ [9].

### **Заключение**

Обнаружено, что мемристорные структуры без слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также при его толщине 3 нм, изначально находятся в проводящем состоянии и для начала РП требуют проведения антиформовки. Структуры с дополнительным слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 6 и 9 нм могут изначально находиться как в проводящем, так и в непроводящем состояниях. Установлено, что оба типа структур, изначально находящиеся в различных резистивных состояниях и прошедшие процедуры антиформовки и электроформовки, после нескольких циклов измерения ВАХ не демонстрировали при последующих измерениях существенных различий в величинах токов и напряжениях переключения.

Полученные результаты могут быть использованы для изготовления «бесформовочных» мемристоров, что актуально для КМОП-интеграции подобных устройств.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FSWR-2022-0009. Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» и Учебного дизайн-центра электроники ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

- [1] Chua L.O. // IEEE Transactions on Circuit Theory. 1971. Vol. 182, No. 5. P. 507.
- [2] Huang X.-D., Li Y., Li H.-Y., Xue K.-H., Wang X., Miao X.-S. // IEEE Electron Device Lett. 2020. Vol. 41, No. 4. P. 549.
- [3] Ismail M., Abbas H., Choi C., Kim S. // J. Alloys Compd. 2020. Vol. 835. P. 155256.
- [4] Persson K.-M., Ram M. S., Wernersson L.-E. // IEEE Journal of the Electron Devices Society. 2021. Vol. 9. P. 564.
- [5] Liu J., Yang H., Ma Z., Chen K., Zhang X., Huang X., Oda S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. Vol. 51, No. 2. P. 025102.
- [6] Abbas H.A. Stabilized Zirconia for Solid Oxide Fuel Cells or Oxygen Sensors: Characterization of Structural and Electrical Properties of Zirconia Doped with Some Oxides. – LAP Lambert Academic, 2012.
- [7] Guo Y., Robertson J. // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105, No. 22. P. 223516.
- [8] Зубков С.Ю., Антонов И.Н., Горшков О.Н., Касаткин А.П., Крюков Р.Н., Николичев Д.Е., Павлов Д.А., Шенина М.Е. ФТТ. 2018. Т. 60, № 3. С. 591.
- [9] Gorshkov O.N., Mikhaylov A.N., Kasatkin A.P., Tikhov S.V., Filatov D.O., Pavlov D.A., Belov A.I., Koryazhkina M.N., Bobrov A.I., Malekhonova N.V., Gryaznov E.G., Antonov I.N., Shenina M.E. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 741, No. 1. P. 012174.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИНАПТИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ НА КАЧЕСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ

А.А. Лебедев<sup>1)</sup>, В.Б. Казанцев<sup>1, 2)</sup>, С.В. Стасенко<sup>1, 2)</sup>

<sup>1)</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского

<sup>2)</sup> МФТИ

Изучение принципов кодирования информации в нейронах является важной задачей современной нейродинамики, привлекающей все больший интерес в контексте импульсных нейронных сетей (SNN) – вычислительных моделей, основанных на биологических зависимостях. Основным аспектом кодирования в SNN является использование последовательностей импульсов, представляющих собой дискретные события, в которых время и скорость активности нейронов играют ключевую роль. Для анализа этих процессов применяются различные подходы, основанные на наблюдениях нейрональной активности, такие как частотное, временное и пакетное кодирование[1]. В нашей работе мы использовали импульсное кодирование входного сенсорного стимула в импульсной нейронной сети на основе модели нейрона LIF [2] как новую метрику для задачи классификации.

Проблема классификации включает в себя несколько этапов, а именно - выделение признакового пространства, кодирование данных, разделение пространства на классы и оценку результатов. Классическая задача классификации изображений требует большого объема размеченных данных, в качестве которых была выбрана база данных MNIST[3], где каждое изображение представляет собой матрицу пикселей. В нашей работе основное внимание уделяется оценке качества признакового пространства, зависящему от синаптической пластичности модели.

Мы создали и протестировали восемь конфигураций модели импульсной нейронной сети с синаптической пластичности в возбуждающих и тормозных синапсах, схематически приведенных на рис. 1.

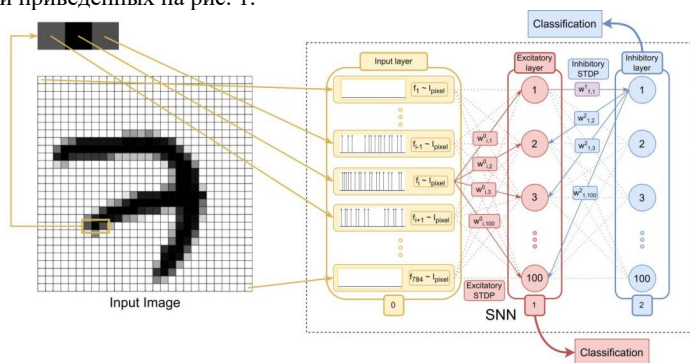


Рис. 1

Схема формирования нового признакового описания изображения с детальной схемой спайковой нейронной сети с синаптической пластичностью.



Желтым цветом выделен входной слой (нулевой слой), представляющий собой набор последовательностей спайков, распределенных по Пуассону с частотой ( $f_i$ ), равной интенсивности отдельного пикселя изображения. Количество последовательностей спайкой равна количеству пикселей кодируемого изображения. Красным цветом обозначена возбуждающая популяция нейронов (первый слой), синим - тормозная популяция нейронов (второй слой).

В качестве метрики для выделения признакового пространства мы использовали количество импульсов, возникших внутри выбранного слоя нейронной сети в результате воздействия на нее внешним стимулом. Классификация изображений была выполнена с использованием алгоритма Random Forest. Наилучшие результаты были получены при использовании только возбуждающей синаптической пластичности, в то время как наихудшие результаты были достигнуты при использовании только тормозной синаптической пластичности, что отобразено в табл. 1 и табл. 2.

Табл. 1

	eSTDP ON	iSTDP OFF
eSTDP ON	0.736	0.683
iSTDP OFF	0.803	0.745

Сравнительная таблица точности для 4 конфигураций моделей классификации с возбуждающей популяцией. eSTDP - синаптическая пластичность между входными стимулами и возбуждающим слоем нейронов, iSTDP - синаптическая пластичность между тормозным и возбуждающим слоями. Конфигурация пластичности, которая дает лучшие результаты, выделена цветом.

Табл. 2

	eSTDP ON	iSTDP OFF
eSTDP ON	0.742	0.700
iSTDP OFF	0.813	0.745

Сравнительная таблица точности для 4 конфигураций моделей классификации с тормозной популяцией. eSTDP - синаптическая пластичность между входными стимулами и возбуждающим слоем нейронов, iSTDP - синаптическая пластичность между тормозным и возбуждающим слоями. Конфигурация пластичности, которая дает лучшие результаты, выделена цветом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №23-11-00134.

- [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.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПРОВОДЯЩЕМ КАНАЛЕ МЕМРИСТОРА НА ОСНОВЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ

Е.В. Окулич<sup>1)</sup>, В.И. Окулич<sup>2)</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского

<sup>2)</sup> Нижегородский институт управления – филиал РАНХиГС

### 1. Введение

В последние годы исследования явления резистивного переключения в мемристорах на основе неорганических перешли в фазу практического изготовления соответствующих приборов микроэлектроники [1]. Но для одного из основных материалов этой сферы, для которого существуют хорошо апробированные технологии – аморфных плёнок диоксида кремния – остаются нерешёнными многие вопросы о природе явления мемристивного переключения, причинах нестабильности и деградации мемристоров на этой основе. В частности, по одной из версий основными агентами мемристивного эффекта в плёнках диоксида кремния являются вакансии кислорода и их дрейф из и в область филамента [2] и, причём наиболее ярко этот эффект проявляется для плёнок со стехиометрией  $\text{SiO}_{1.7}$ , по другой – междоузельные нанокластеры кремния [3]. Также сообщалось о положительном влиянии на качество мемристора в глубоко нестехиометрическом диоксиде  $\text{SiO}_{1.1}$  [4] и облучения ионами  $\text{Si}^+$ . Заметим, что явление мемристивного переключения может сопровождаться достаточно глубокой перестройкой атомной структуры аморфного диоксида в области филамента, поскольку в проводящем режиме локальная температура может достигать порядка  $1000^\circ\text{C}$ .

Для выяснения эволюции структуры филамента в мемристоре на основе аморфного диоксида кремния было проведено моделирование указанного явления методом молекулярной динамики процессов для следующих вариантов:

1. дефицита атомов кислорода ( $a\text{-SiO}_{1.7}$ ) и избыточной концентрации атомов Si, внедрёнными в  $\text{SiO}_2$  методом ионной имплантации с энергией 20 кэВ (доза  $\sim 10^{15}\text{см}^{-2}$ ) при  $T = 1500\text{K}$  (время = 100 нс);
2. большого дефицита атомов кислорода ( $a\text{-SiO}_{1.1}$ ) при  $T = 1500\text{K}$  (время = 100 нс);
3. большого дефицита атомов кислорода ( $a\text{-SiO}_{1.1}$ ) при  $T=1500\text{K}$  и одновременном уходе атомов кислорода из структуры (время = 50 нс);
4. исходного  $a\text{-SiO}_2$  при  $T = 1500\text{K}$  и одновременном уходе атомов кислорода из структуры (время = 50 нс).

### 2. Метод расчета

Моделирование проводилось на кластере аморфного диоксида кремния размером  $60 \times 60 \times 60 \text{ \AA}^3$  со структурой, соответствующей описанным выше вариантам. В частности, для создания структуры, насыщенной атомами кремния и дефектами за счет облучения ионами  $\text{Si}^+$  использовались данные, полученные программой SRIM. Параметры при облучении были: доза  $1 \cdot 10^{17}\text{см}^{-2}$ ,  $E = 20 \text{ кэВ}$ . Процессы атомной перестройки при отжиге моделировались методом молекулярной динамики с использованием пакета LAMMPS при температуре 1500 К с использованием потенциала Терсоф. Проводилась оценка структурных характеристик моделируемого объёма с использованием

специально созданного комплекса программ. Это позволило наблюдать эволюцию числа, взаимного расположения скоплений атомов кремния и кислорода, размеров кластерных образований. В рамках исследований рассчитывались радиальные функции распределения (РФР), строились графики функций распределения углов между связями, что позволило сделать выводы о качественных изменениях моделируемой структуры.

### 3. Анализ результатов

#### 3.1 Результаты при облучении кремнием

На рис. 1 показан результат изменения со временем количества кластеров в моделируемом объеме филамента в мемристоре, сформированном на базе оксида  $\text{SiO}_{1.7}$ , который был подвергнут облучению ионами  $\text{Si}^{+}$ . (Предполагается, что после облучения до формовки филамента структурное состояние оксида сохраняется, его изменение происходит во время работы мемристора, когда в области филамента имеет место джоулев нагрев).

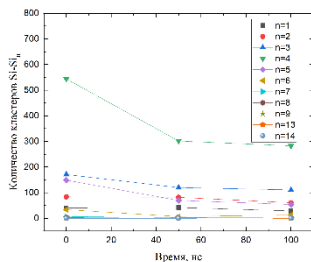


Рис. 1

Как видно на рис. 1, уже к началу отжига, т.е. в момент  $t = 0$  с, в модельном объеме присутствуют кластеры  $\text{Si-Si}_n$ , образование которых в рамках используемого алгоритма происходит в результате релаксации, являющейся началом процедуры в программе LAMMPS. По мере отжига количество кластером с относительно малым  $n \leq 5$  снижается, но наблюдается тенденция к стабилизации за рассматриваемый промежуток времени. Обращает на себя внимание, что перестройка происходит за достаточно короткое время.

На рис. 2 представлены данные РФР.

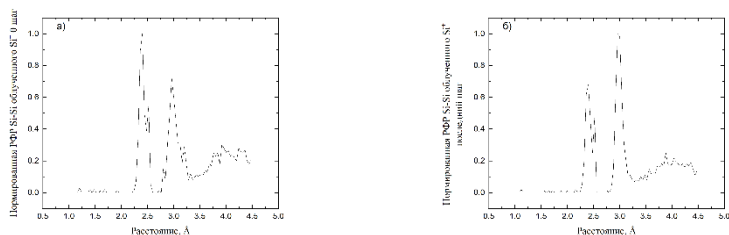


Рис. 2

Из этих данных следует, что к концу данного промежутка времени наблюдается остаточное количество атомов Si, находящиеся друг от друга на малых расстояниях. Это обстоятельство связано с не отождёнными радиационными дефектами.

### 3.2 Результаты для отжига $\text{SiO}_{1.1}$

На рис. 3 показано, каким образом изменяется структура оксида  $\text{SiO}_{1.1}$ , смоделированная путём случайного удаления атомов кислорода, на начальном этапе высокотемпературного отжига.

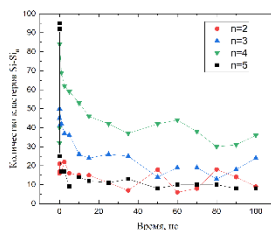


Рис. 3

Из полученных данных видно, что еще до начала отжига ( $t = 0$  с) в оксиде присутствуют компактные образования атомов различного состава, что обусловлено стохастическим распределением введенных при формовке оксида вакансий. Число «крупных» ( $n = 4, 5$ ) скоплений типа  $\text{Si-Si}_n$  в первые же наносекунды резко уменьшается, а затем за времена порядка 100 нс изменяется более медленно, испытывая флуктуации. Такой характер перестройки указывает на частичное протекание процессов «расслоения» оксида на фазы  $\text{SiO}_2$  и Si. Отметим, что эти процессы при температуре 1500 К протекают уже на самом раннем этапе отжига, и возможно приводят к образованию филаментов уже до создания мемристоров, не требующих формовки.

### 3.3 Результаты при уходе атомов кислорода

Результаты моделирования структурных изменений при «уходе» кислорода (поставки кислородных вакансий) из области филамента для двух стехиометрий оксида –  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiO}_{1.1}$  представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно, где показаны изменения во времени количества различных кластеров типа  $\text{Si-Si}_n$ . Видно, что кинетические изменения числа кластеров в случае ухода для обоих оксидов качественно идентичны и свидетельствует о быстром процессе образования кремниевых кластеров, особенно состоящих из четырех атомов (структурная единицы чистого кремния). Эти кластеры, скорее всего, можно рассматривать как зародыши нановключений кремния, формирующихся на стадии SET, которые возможно оказывают существенное влияние на сопротивление филамента в низкоомном состоянии.

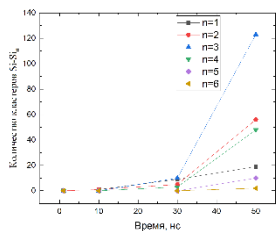


Рис. 4

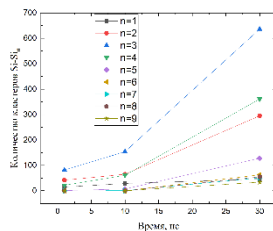


Рис. 5

#### 4. Выводы

Результаты выполненных расчетов показали, что в условиях работы мемристоров на основе  $\text{SiO}_x$ , при которых температура в области филамента может превышать 1000 К, происходят процессы образования и распада кластеров различных конфигураций. Причем характерные времена протекания этих процессов составляют единицы или десятки наносекунд. Влияние различных кластеров на протекание тока по филаментам требует отдельного рассмотрения, как и задача об их влиянии на вольт-амперные характеристики в циклах переключения и на эволюцию ВАХ при многократном повторении циклов с учетом стохастической природы процессов, происходящих при работе мемристивных структур. Это влияние зависит от количества филаментов в мемристоре (следовательно, от его площади), а также от длительности подаваемых на него импульсов напряжения и величины ограничения тока.

Корректное моделирование процессов протекания тока при его работе требует отдельного рассмотрения с учётом структурных перестроек на стадиях SET и RESET, в том числе в случаях применения ионной имплантации. Стохастический характер перестроек может приводить к постепенному накоплению отрицательных, с точки зрения работы мемристора, изменений и деградации его характеристик. Использование ионной имплантации позволяет в определенной степени управлять процессами перестроек и тем самым способствовать улучшению характеристик прибора. Молекулярно-динамическое моделирование процессов в филаментах для различных вариантов используемой технологии дает возможность оптимизировать технологические режимы.

Настоящая работа выполнена в рамках государственного задания по созданию новых лабораторий для электронной промышленности (№ FSWR-2022-0009).

- [1] Mikhaylov A.N. et al. // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2021. Vol. 144. P. 110723.
- [2] Guseinov D.V. et al. // *International Journal of Nanotechnology*. 2017. Vol. 14 (7/8). P. 604.
- [3] Ma Y. et al. // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2018. Vol. 10 (27). P. 23187.
- [4] Okulich E.V. et al. // *Technical Physics Letters*. 2020. Vol. 46. P. 19.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕМРИСТИВНЫХ УСТРОЙСТВ В НЕЙРОМОРФНЫХ СИСТЕМАХ

Д.Д. Пахомова, Е.Д. Будылина, А.В. Лебедева, М.Н. Коряжкина

*ННГУ им. Н.И. Лобачевского*

На сегодняшний день во всем мире достаточно распространенной причиной смертности и инвалидности являются нейродегенеративные заболевания и расстройства. Многие из них напрямую связаны со специфическими аномалиями динамики активности нейронов. Терапевтические стратегии, основанные на прямой модуляции активности нейронов, демонстрируют отличные результаты. Мемристоры (или мемристоривные устройства) – новые элементы электронной компонентной базы, обладающие простотой изготовления, малыми размерами, высокой скоростью работы и низким энергопотреблением. Такие устройства способны имитировать работу нейронов и синапсов, что позволяет рассматривать их как основного кандидата для реализации функций электронного синапса в нейропротезах нового поколения.

Впервые существование мемристора теоретически доказал американский ученый Леон Чуа в 1971 году. Работа мемристора основана на эффекте резистивного переключения – явления, при котором сопротивление функционального диэлектрика изменяется в ответ на приложение внешнего электрического поля. В зависимости от материалов функционального диэлектрика и электродов, и управляющего протокола мемристор может переключаться как между двумя крайними резистивными состояниями, называемыми состоянием с высоким сопротивлением (СВС) и состоянием с низким сопротивлением (СНС), так и плавно (аналоговым образом) изменять свое резистивное состояние [1].

Одними из часто используемых материалов в качестве функционального диэлектрика являются оксиды металлов. К преимуществам мемристоров на основе оксидов металлов относят высокую устойчивость к многократным резистивным переключениям. На данный момент диоксиды циркония и гафния, в том числе стабилизированные оксидом иттрия, а также оксид титана относят к перспективным материалам для применения в мемристоривных устройствах.

Сегодняшнее понимание природы изменения резистивного состояния мемристора базируется на концепции управления параметрами проводящих каналов (филаментов), формирующихся внутри функционального диэлектрика под действием электрического поля. Резистивное переключение мемристора из СНС в СВС (из СВС в СНС) достигается путем разрыва (восстановления) филамента путем приложения напряжения соответствующей полярности. В зависимости от используемых материалов, филаменты могут состоять из кислородных вакансий функционального диэлектрика или атомов металла, инжектированных из электродов, или и тех, и других.

За последнее десятилетие активно возрос исследовательский интерес в области изучения нейроморфных технологий [2]. Особый интерес представляет использование мемристоривных устройств в этом контексте. Это связано рядом недостатков традиционной концепции построения компьютеров (архитектура фон Неймана). Согласно этой концепции, блок хранения памяти и центр обработки информации оказываются пространственно разделены, что для работы системы вызывает необходимость в

постоянном обмене данных, а это в свою очередь увеличивает энергопотребление и снижает энергоэффективность обработки информации и всей системы в целом.

Альтернативой выступает разработка так называемых нейроморфных систем. В отличие от классической архитектуры, эти системы проектируются с учетом биологических принципов работы мозга. Некоторые элементы здесь используются для записи и хранения информации, а также ее изменения. Используя нейроморфизм, эти системы стремятся достичь высокой энергоэффективности и параллельной обработки информации. Для работы системы также необходимо предварительное обучение, оно связано с понятием синаптической пластичности – способности системы изменять коэффициент связи между нейронами, который называется синаптическим весом. Синапсы в искусственных нейронных сетях играют ключевую роль в обработке информации и принятии решений. Изменения весов синапсов в процессе обучения позволяет сети адаптироваться к новым данным и заданиям, и приобретать способность к решению разнообразных задач.

Известно, что синапсы, осуществляющие связь между нейронами, могут влиять на интенсивность сигнала и скорость его передачи между нейронами. Именно синапсы определяют силу взаимосвязи между клетками нервной системы. Также, на сегодняшний день имеются сведения, что информационные функции мозга определяются не свойствами конкретных клеток, а свойством пластичности – способности мозга изменять свою структуру и функции в ответ на различные стимулы, опыт и обучение. В основе синаптической пластичности лежит способность нейронов изменять силу своих синапсов в процессе обучения. Двумя ее основными формами являются долгосрочная потенцияция и долгосрочная депрессия, позволяющие синапсам усиливаться или ослабевать в зависимости от частоты, амплитуды и времени активации. Это свойство нашего мозга позволяет импульсам менять пути своего распространения.

Искусственные нейронные сети используются для решения сложных задач в областях распознавания образов, классификации данных, прогнозирования, управления. Рабочие алгоритмы этих сетей имитируют работу настоящих биологических. К элементу, представляющему нейрон, поступают все сигналы, которые затем суммируются. Синапсы в ИНС определяются специальными весовыми переменными, отражающими важность каждой конкретной связи между нейронами (синаптическими весами). Именно математические мемристоры используются для моделирования синаптической связи.

Мемристоры могут быть естественным образом реализованы в архитектуре «кроссбар», в которой роль нейронов разных уровней играют вертикальные и горизонтальные шины, а в точках пересечения проводящих шин лежат мемристоры, выступающие в качестве синаптических весов. Именно проводимость мемристоры определяет связь между нейронами. Интеграция в нейроморфные чипы мемристоров способствует созданию компактных, энергоэффективных и высокопроизводительных систем искусственного интеллекта.

В настоящее время по всему миру активно ведутся исследования в области реализации нейроморфных чипов на основе мемристоров и разработки нейроморфных компьютеров. Поскольку эти области связаны с вычислительной техникой, обработкой крупных массивов данных, роботизацией и нейропротезированием.

На сегодняшний день также активно ведутся исследования и разработки в области нейрогибридных систем. Эти системы представляют собой синергетический сплав живых нейронных сетей и искусственных компонентов. Нейрогибридные технологии обладают огромным потенциалом для различных применений: в области здравоохранения нейрогибридные системы могут произвести революцию в лечении неврологических расстройств, в области робототехники – к созданию более интеллектуальных и адаптивных роботов, в области искусственного интеллекта – обеспечить новую парадигму обработки информации и вычислений, называемую «вычисления в памяти».

Нейроморфные системы считаются энергоэффективными и способными обрабатывать данные в реальном времени, что делает их важными компонентами нейрогибридных технологий следующего поколения, направленных на восстановление мозга. В этом контексте решающее значение имеет разработка интерфейса между вычислительным устройством и биологической системой, работающего в реальном времени. Основным драйвером роста и развития интерфейса «мозг-машина» в последние годы стало использование все более сложных методов машинного обучения для декодирования нейронной активности и управления различными типами протезных устройств, таких как протезы рук, курсоры, орфографы и роботы. Обработка и декодирование нервных сигналов в реальном времени играют решающую роль в биогридных нейропротезах, поскольку они обеспечивают обратную связь для модуляции или замены нейронной функции. Однако с этим процессом связано несколько технологических проблем, включающих в себя необходимость сложных вычислений в режиме реального времени, обработку больших объемов данных из сотен или тысяч каналов и извлечение значимых функций для стимулирования. Для решения этих проблем интеграция ИНС с биогридными системами стала новой стратегией. ИНС предлагают адаптивное и естественное взаимодействие между биологическими и искусственными компонентами. Их можно использовать для таких задач, как обнаружение сигналов, классификация и моделирование биологической нейронной сети.

Значительный прогресс в разработке мемристивных нейрогибридных систем был достигнут А.Н. Михайловым, С.А. Щаниковым и их коллегами [3]. Их исследование продемонстрировало первую в мире двунаправленную адаптивную нейроинтерфейсную систему, использующую мемристоры. В экспериментах была использована живая культура нейронов гиппокампа с функциональными связями между группами клеток, организованными посредством микрофлюидного чипа. Мемристивная сеть была использована помимо решения задачи нелинейной классификации пространственно-временного отклика клеточной культуры на электрические стимулы также участвовала в регулировании функционального состояния нейрональной сети. В конечном итоге нарушенные связи в культуре были восстановлены благодаря адаптивному управлению стимуляцией сигналами с мемристивной сети.

Группой, возглавляемой С.А. Герасимовой и А.В. Лебедевой, предложена технология адаптивной стимуляции, демонстрирующая возможность восстановления функциональности перфорантного пути гиппокампа путем введения в него нейроморфной системы для замещения утраченных участков [4]. В работе использована система, состоящая из нейроноподобных генераторов ФитцХью-Нагумо, соединенных мемристивным устройством для обеспечения адаптивной стимуляции гиппокампа грызунов. Генератор искусственных нейронов подключали к определенной части гиппокампа



грызунов. Электросхема воспроизводила сигналы, имитирующие активность мозга, которые направлялись на срезы мозга, и неповрежденные нейроны гиппокампа отвечали на полученный стимул непосредственно своими сигналами. В результате генератор начинал функционировать в ритме гиппокампа, обеспечивая восстановление утраченных функций. Потенциально такое замещение поврежденного участка гиппокампа может быть использовано не только для восстановления нейрональной активности, но и для улучшения нормальных функций (памяти и способности к обучению). Авторы также предполагают, что эта технология может стать основой для реализации нейропротезов, способных регулировать работу мозга людей, страдающих от эпилепсии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-21-00440).

- [1] Koryazhkina M., Okulich E., Antonov I. et al. // Proceedings of the 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications. 2023. P. 148.
- [2] Finocchio G., Incorvia J.A.C., Friedman J.S. et al. // Nano Futures. 2024. Vol. 8. P. 012001.
- [3] Shchanikov S., Zuev A., Bordanov I. et al. // Chaos, Solitons & Fractals. 2021. Vol. 142. P. 110504.
- [4] Gerasimova S.A., Lebedeva A.V., Fedulina A. et al. // Chaos, Solitons & Fractals. 2021. Vol. 146. P. 110804.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТА ПОЛИ-(*l*-КСИЛИЛЕН)- $\text{MOO}_x$ В АРХИТЕКТУРЕ КРОССБАР

М.А. Рябова<sup>1,2</sup>, А.Н. Мацукатова<sup>1,3</sup>, А.В. Емельянов<sup>1,2</sup>

<sup>1)</sup> НИЦ «Курчатовский институт»

<sup>2)</sup> МФТИ

<sup>3)</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова

Улучшение характеристик мемристоров является актуальной задачей для повышения энергоэффективности и точности современных нейроморфных вычислительных систем (НВС) на их основе. Мемристором называют устройство, в функциональном слое которого наблюдается эффект резистивного переключения (РП). Поиск «идеальной» мемристивной структуры до сих пор продолжается. Использование гибридных материалов (например, нанокompозитов с органической матрицей и неорганическими включениями) в мемристивных структурах является одним из важных и быстроразвивающихся направлений. В литературе уже продемонстрированы хорошие мемристивные характеристики такого органического материала, как поли-(*l*-ксилилен) (ППК) [1], а также гибридных материалов на его основе [2]. В [3] были изучены основные параметры РП одиночных структур на основе ППК- $\text{MoO}_x$ , а также был описан возможный механизм РП в рассматриваемой структуре. Однако, для последующего внедрения таких мемристоров в нейроморфную вычислительную систему важно исследовать характеристики структуры в удобной для вычислений архитектуре кроссбар.

В данной работе предметом исследования является кроссбар  $8 \times 4$  на основе ППК- $\text{MoO}_x$  с верхним электродом из меди и нижним электродом из золота на кремниевой подложке (схематическое изображение структуры представлено на вставке к рис. 1). Характеристики мемристивной структуры исследовались с помощью аналитической зондовой станции 3S SWIN EPS4. Импульсы напряжения подавались на верхний электрод (при заземленном нижнем электроде) от источника-измерителя Keithley 2636B, запрограммированного в среде LabVIEW. На рис.1 представлено 30 последовательных циклов вольт-амперной характеристики (ВАХ) для одного устройства из кроссбар-матрицы, демонстрирующие хорошую воспроизводимость характеристик от цикла к циклу. Также наблюдается хорошая воспроизводимость от устройства к устройству (см. рис. 2, на котором изображены медианные кривые ВАХ по 10 циклам пяти случайно выбранных устройств из кроссбар-матрицы). Особенно важно для практического применения то, что исследуемые образцы обладают высоким выходом годных устройств: 28 из 32 устройств демонстрируют эффект РП. Стоит отметить, устройства выдерживают до 3000 циклов РП.

Мемристоры в НВС могут выполнять разные задачи. Например, мемристор может выступать в роли синапса в НВС при работе в энергонезависимом (неволатильном) режиме или в качестве динамического резервуара в резервуарной вычислительной системе (РВС) при работе в энергозависимом (волатильном) режиме. Обычно мемристоры работают в одном единственном режиме, и для указанных задач необходимы различные мемристивные структуры.

Исследуемая в данной работе структура отличается сосуществованием неволатильного и волатильного режимов работы. Так при относительно малом токе

ограничения и относительно малом напряжении чтения устройство работает в волатильном режиме: изначально установленное резистивное состояние не сохраняется в отсутствие внешнего воздействия на структуру (рис. 3). Однако при повышении тока ограничения и напряжения чтения устройство переходит в неволатильный режим работы: наблюдается удержание резистивных состояний без внешнего воздействия (рис. 4).

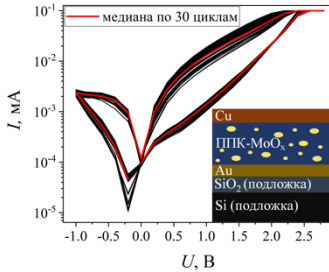


Рис. 1

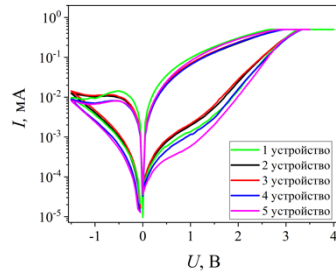


Рис. 2

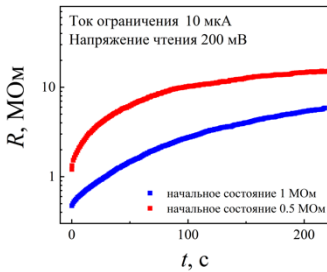


Рис. 3

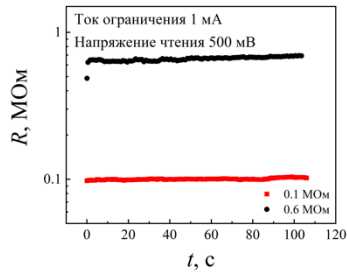


Рис. 4

Для исследования возможности применения мемристора на основе ППК- $\text{MoO}_x$  в роли резервуара в РВС был проведен следующий эксперимент. На устройство подавались последовательности импульсов напряжения, соответствующие восьми возможным комбинациям 3-х битных образов из логических «0» ( $U = 50$  мВ) и «1» ( $U = 4$  В). Далее с устройства считывался ток на напряжении чтения 800 мВ. Каждый образ подавался на устройство в случайном порядке 10 раз. На рис. 5 представлены диаграммы размаха тока после подачи каждого паттерна. Полученные данные о разделении образов мемристором были использованы в качестве входных данных для считывающего слоя РВС для решения задачи классификации рукописных цифр из датасета MNIST (подробная методика описана в [4]). Несмотря на наличие пересечений диаграмм размаха для различных образов (рис. 5), была достигнута точность классификации  $> 90\%$ .

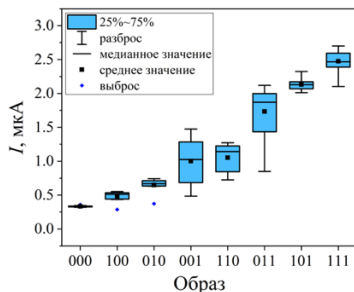


Рис. 5

### **Выводы**

В работе получены основные мемристивные характеристики устройств кроссбар-матрицы на основе нанокompозита ППК- $\text{MoO}_x$ : высокая воспроизводимость параметров РП от цикла к циклу и от устройства к устройству, достаточная выносливость к циклическим РП, хороший выход годных устройств. Продemonстрировано сосуществование волатильного и неволатильного режимов РП, задаваемых током ограничения. Исследована возможность применения мемристоров на основе нанокompозита ППК- $\text{MoO}_x$  в качестве резервуара в РВС. Получены первые результаты моделирования резервуарной вычислительной системы на примере классификации датасета MNIST.

### **Благодарности**

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФ № 24-19-00200 (синтез структур и исследование основных характеристик). Работа частично выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» (эксперимент с резервуаром и моделирование сети).

- [1] Minnekhanov A.A., Emelyanov A.V., Lapkin D.A., Nikiruy K.E., Shvetsov B.S., Nesmelov A.A., Rylkov V.V., Demin V.A., Erokhin V.V. // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. P. 10800.
- [2] Matsukatova A.N., Vdovichenko A.Y., Patsaev T.D., Forsh P.A., Kashkarov P.K., Demin V.A., Emelyanov A.V. // Nano Research. 2023. Vol. 16. P. 3207.
- [3] Мацукатова А.Н., Трофимов А.Д., Емельянов А.В. // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118, №. 5. С. 355.
- [4] Prudnikov N.V., Kulagin V.A., Battistoni S., Demin V.A., Erokhin V.V., Emelyanov A.V. // Phys. Status Solidi A. 2023. Vol. 220. P. 2200700.

## ПРИМЕНЕНИЕ ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ЭПИЛЕПТИФОРМНОЙ АКТИВНОСТИ

Е.Д. Будылина, И.М. Кипелкин, С.А. Герасимова, А.В. Лебедева

*ННГУ им. Н.И. Лобачевского*

### **Введение**

Научно-исследовательская работа направлена на изучение возможностей модуляции эпилептиформной активности головного мозга мышей для подавления патологических осцилляций с помощью осцилляторных нейронных сетей. В данный момент уже существуют исследования по прерыванию эпилептической активности с помощью методов глубокой и транскраниальной стимуляции мозга, однако вопрос разработки систем с более гибкой настройкой параметров модулирующего сигнала для разных ритмов патологической активности всё ещё не решен.

Эпилепсия как сетевое заболевание головного мозга предполагает изучение синхронизации в сложных нейронных сетях, при этом синхронизация зависит от локальной динамики и связей осцилляторов. Изучение полученного сигнала в различных моделях позволит прийти к углублённому пониманию механизмов возникновения и прекращения эпилептиформной активности в головном мозге модельных животных и человека, что особенно актуально для дальнейшей разработки протоколов прекращения эпилептических приступов.

Целью работы являлось изучение активности нейронов гиппокампа мышей на различные протоколы стимуляции в норме и при индуцированной эпилепсии.

### **Материалы и методы**

Для работы использовались мыши различных линий в возрасте от 2х месяцев. Работа состояла из экспериментов *in vitro*. Регистрировались локальные полевые потенциалы нейронов в зоне СА1 при стимуляции в СА3 области. Затем проводилась индукция эпилептиформной активности в срезе гиппокампа путём добавления раствора 4-аминопиридина, после чего вновь проводилась стимуляция с использованием тех же протоколов.

В экспериментах *in vitro* оценивались локальные полевые потенциалы здоровых нейронов и локальные потенциалы после индукции эпилептиформной активности. Протоколы стимуляции включали использование ступенчатых стимулов разной частоты, амплитуды и длительности, а также стимулы различной формы, подаваемые с генератора.

Основные правила содержания и ухода за животными соответствовали биоэтическим нормативам, данным в руководстве «Guide for care and use of laboratory animals (ILAR publication, 1996, National Academy Press)», в Приказе Министерства здравоохранения и Российской Федерации от 15 августа 2016 г. № 199н «Об утверждении Правил надлежащей лабораторной практики»; Национальном стандарте РФ ГОСТ 33044–2014 «Принципы надлежащей лабораторной практики»; Санитарно-эпидемиологических правилах СП 2.2.1.3218-14 "Санитарно-эпидемиологические требования к устройству, оборудованию и содержанию экспериментально-биологических клиник (вивариев)", утвержденные главным государственным санитарным врачом Российской Федерации

от 29 августа 2014 №51, зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации от 31 октября 2014 года, регистрационный N 34547 и согласованы с Этическим комитетом при ФГБОУ ВО НижГМА Минздрава России. Утилизацию биологического материала производили в соответствии с санитарными правилами и нормами N2.1.7.3684-21 от 1 марта 2021 года «Санитарно-эпидемиологические требования к обращению с медицинскими отходами».

### *Изменение локальных полевых потенциалов зоны CA1 при стимуляции после индукции эпилептиформной активности*

Были получены электрофизиологические данные при стимуляции нейронов зоны CA1 ступенчатым стимулом до и после индукции эпилептиформной активности 2M раствором 4-аминопиридина (рис. 1).

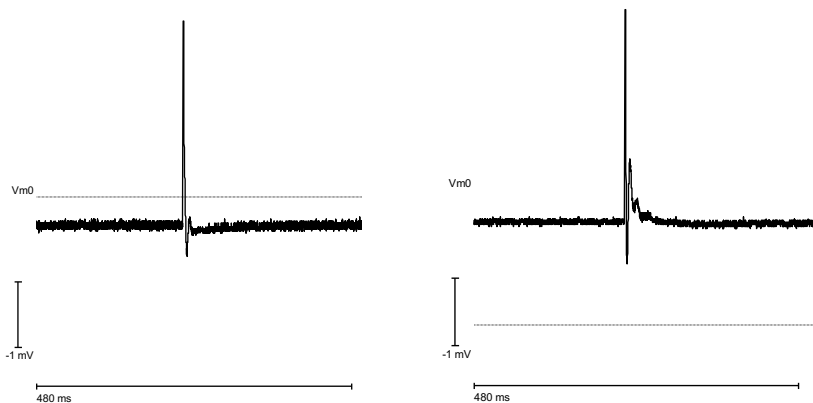


Рис. 1

По своей сути 4-аминопиридин является хемоконвольсантом, блокатором калиевых каналов нервных клеток. Блок калиевых каналов останавливает выход ионов калия из клеток, продлевает реполяризацию мембраны и усиливает формирование потенциала действия, тем самым создавая необходимое для судорожной активности гипервозбуждение.

Затем стимуляция проводилась в тех же зонах с использованием волн сложной формы. Для этого использовался осциллограф и генератор сигналов (примеры экспериментального отклика нейронов представлены на рис. 2).

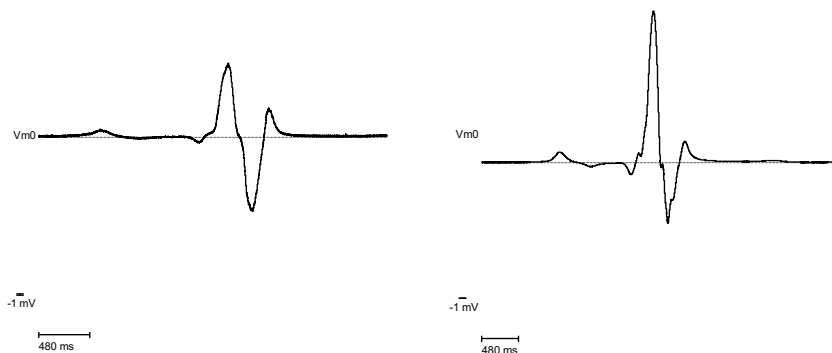


Рис. 2

В дальнейшем планируется продолжение изучения откликов нейронов гиппокампа на стимулирующие импульсы, сгенерированные нейронной сетью на основе модели ФитцХью-Нагумо для единичного нейрона.

Анализ изменений локальных полевых потенциалов при индукции эпилептиформной активности поможет в дальнейшей разработке протоколов её модуляции и подавления. Создание нейронной сети, способной выдавать нужные модулирующие сигналы, позволит добиться контроля длительности и интенсивности судорожных припадков, а приближение модулирующих сигналов к естественной нейронной активности может снизить нежелательные побочные эффекты. В целом, пусть модуляция эпилептических осцилляций и не приведет к лечению первопричины эпилепсии, она поможет в понимании механизмов формирования и прекращения эпилептиформной активности, и, потенциально, приведет к сокращению частоты, длительности и интенсивности патологической активности головного мозга.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-21-00440).

## МЕМРИСТОРНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ КМОП КНИ 0,35 МКМ

В.И. Лукоянов<sup>1,2)</sup>, А.И. Белов<sup>1)</sup>, И.Н. Антонов<sup>1)</sup>, В.Е. Котомина<sup>1)</sup>, Е.Г. Грязнов<sup>1,2)</sup>,  
А.В. Сафонов<sup>1,2)</sup>, А.Ю. Шаров<sup>2)</sup>, А.В. Плотнов<sup>2)</sup>, А.С. Белов<sup>1,2)</sup>, О.Н. Горшков<sup>1)</sup>,  
А.Н. Михайлов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ННГУ им. Н.И. Лобачевского

<sup>2)</sup> Филиал ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

### Введение

На сегодняшний день мемристоривные структуры, проявляющие эффект резистивного переключения, находят применение во многих областях электроники и информационных технологий. Перспективным направлением является использование мемристоривных структур в качестве элементов хранения информации (ячейка памяти ОЗУ, весовой коэффициент нейрона и т.д.). Интерес к памяти RRAM (Resistive Random Access Memory) на основе мемристоривных структур вызван такими ее преимуществами как энергонезависимость (хранение информации в отсутствие напряжения питания), масштабируемость и простота технологии изготовления, достижимость быстрого и энергоэффективного функционирования, а также возможность выполнения вычислений непосредственно в памяти [1-2].

В данной работе было показано, как, благодаря подходу “back-end-of-line” (BEOL), в технологический маршрут традиционного процесса КМОП КНИ (кремний на изоляторе) с проектными нормами 0,35 мкм можно интегрировать процесс формирования мемристоривных структур в верхних слоях металлизации.

### Технология изготовления

В соответствии с подходом BEOL приборный слой формируется в нижележащих слоях микросхемы, в то время как слой с мемристоривными устройствами – в верхних слоях металлизации (рис. 1).

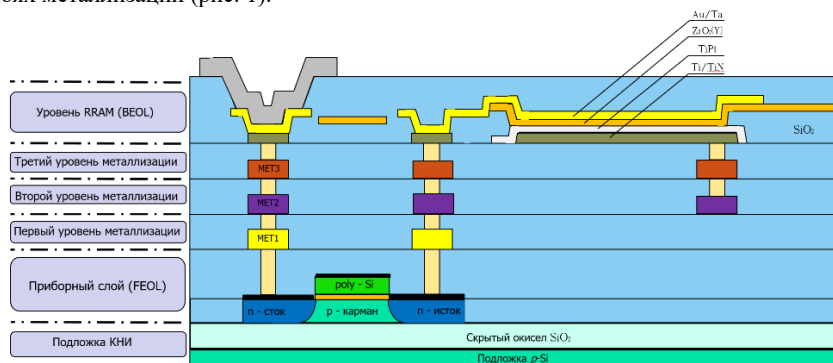


Рис.1



На рис. 2 показана топология тестовой микросхемы памяти, включающая два массива ячеек типа «кроссбар» с различной конструкцией ячеек, а также несколько тестовых функциональных блоков.

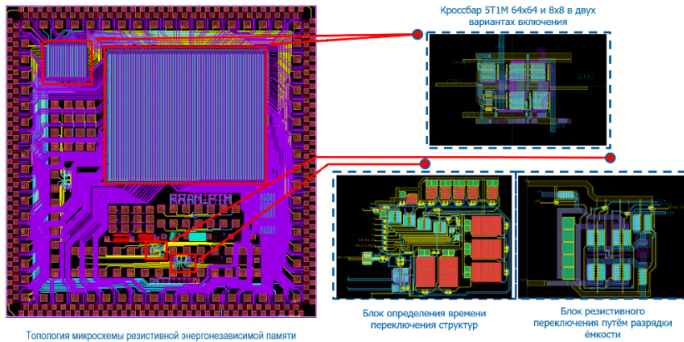


Рис.2

### Схмотехническая реализация ячеек

В литературе одной из самых высокоплотных конструкций является ячейка 1Т1М, состоящая из мемристового устройства и последовательно соединённого с ним  $n$ -канального транзистора, показанная на рис. 3. Однако у такой ячейки присутствует ряд особенностей, связанных с её несимметричностью при изменении полярности напряжения переключения в процессах SET и RESET. В зависимости от положения верхнего электрода мемристора (если имеет значение направленность переключения) в одном из процессов будет реализовываться схема включения истокового повторителя, ограничивающего напряжение на мемристоре. Также в этой ячейке важным является сопротивление мемристора в высокоомном состоянии.

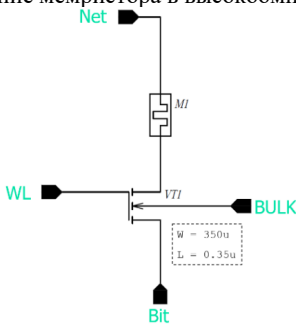


Рис. 3

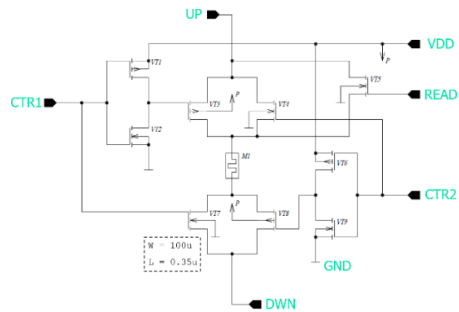


Рис. 4

Указанных недостатков лишена ячейка 5Т1М, показанная на рис. 4. В данной ячейке две пары комплементарных транзисторов работают в ключевом режиме, обеспечивая минимальное падение напряжения (а также сопротивление) на управляющих

элементах. Управление ключами осуществляется путём подачи логического сигнала на выводы CTR1 и CTR2 с использованием пары инверторов для корректных потенциалов на затворах транзисторов. Для операции считывания предусмотрен вывод READ.

### Результаты измерений

Такие ячейки показали воспроизводимое биполярное резистивное переключение (рис. 5), аналогичное переключению для единичного мемристивного устройства.

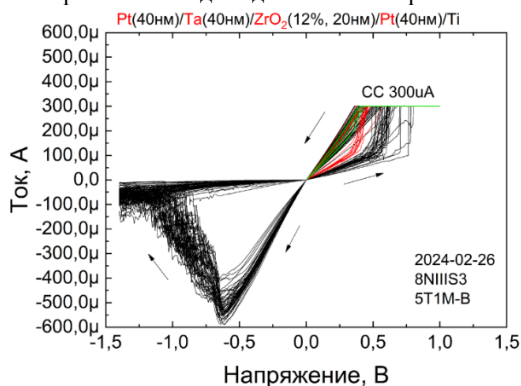


Рис. 5

### Заключение

Таким образом, конструкция новых ячеек 5T1M обеспечивает управление напряжением, подаваемым на мемристивное устройство, не ограничивая при этом ток. При этом плотность компоновки может быть меньше, чем в ячейках 1T1M, в зависимости от размеров ключевых транзисторов. Данный тип ячеек может быть использован как элемент энергонезависимой памяти RRAM в составе матрицы кроссбар.

- [1] Amirsoleimani A., Alibart F., Yon V., Xu J., Pazhouhandeh M.R., Ecoffey S., Beilliard Y., Genov R., Drouin D. // *Advanced Intelligent Systems*. 2020. P. 2000115.
- [2] Михайлов А.Н., Грязнов Е.Г., Лукоянов В.И., Коряжкина М.Н., Борданов И.А., Щаников С.А., Тельминов О.А., Иванченко М.В., Казанцев В.Б. // *Физмат*. 2023. Т. 1, №. 1. С. 42.

## ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ В СРЕЗАХ ГИППОКАМПА ГРЫЗУНОВ

**В.В. Разин, М.И. Самбунова, Н.В. Громов, А.В. Бельтюкова, А.Е. Мальков, С.А. Герасимова, Т.А. Леванова, А.В. Лебедева, Л.А. Смирнов, А.В. Наумов**

*ННГУ им. Н.И. Лобачевского*

Лечение нейродегенеративных заболеваний является крайне актуальной и значимой задачей в сфере медицины. Одним из подходов решения данной проблемы является нейропротезирование, суть которого заключается в замещении естественной системы искусственной, которая поддерживает те же функции или даже позволяет превосходить изначальные возможности исходной.

В рамках данной работы рассматривается задача предсказания сигнала СА1 гиппокампа грызунов по отделу СА3 той же области. В качестве инструмента используются методы искусственного интеллекта, а в частности глубокое обучение, которое демонстрирует хорошие показатели метрик качества в различных задачах медицинской диагностики [1-10]. Для решения задачи были выбраны рекуррентные нейросети LSTM и GRU и резервуарные вычисления.

Данные представляют собой временные ряды, а именно записи локальных полевых потенциалов пар сигналов СА1 и СА3 областей гиппокампа мышей и крыс до и после разрушения области СА1 при различных амплитудах электрической стимуляции от 100 до 1000 микроампер включительно с шагом в 100 микроампер. Это уникальные данные, полученные в лаборатории в результате различных экспериментов [11]. Для обучения различных методов глубокого обучения сигналы очищаются от артефактов, стандартизируются (приводятся к базовой линии) и фильтруются от различного рода шумов. В качестве метрики выступает взвешенная сумма чисел, характеризующих важные параметры оценки полученного сигнала: времена затухания и возрастания ответа, тангенс угла наклона экстремума, а также полуширина ответа.

В результате многочисленных экспериментов были обучены методы: LSTM и резервуар [12], а также сеть GRU [13]. Каждый из методов обучения имеет свои преимущества, которые выражаются в наибольших показателях метрик для усредненных сигналов в случае резервуара и наибольших показателях метрик для записей конкретных амплитуд в случае LSTM и GRU. Также немаловажной составляющей является время обучения, а также возможность размещения на различных платах. В данном сравнении лидером является резервуар, который достаточно быстро обучается, показывает хорошие показатели метрик и даёт возможность разворачивания на недорогих модулях. Данные результаты могут быть полезны в разработке нейрогибридного чипа, способного замещать функции гиппокампа.

В дальнейшем планируется пополнение базы данных проведением новых экспериментов, применение других методов искусственного интеллекта, а именно трансформеров, свёрточных сетей, множества машинных методов, построение различного рода ансамблей и последующая интеграция полученных результатов в физическое устройство, способное заменять или даже улучшать определенные функции головного мозга.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-75-10099).

- [1] Razin V. [et al.]. Solving the Problem of Diagnosing a Disease by ECG on the PTB-XL Dataset Using Deep Learning // International Conference on Neuroinformatics. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. P. 13.
- [2] Разин В.В., Краснов А.А., Золотых Н.Ю. Глубокое обучение в задачах диагностики заболевания по ЭКГ на наборе данных PTB-XL // Математика и ИТ – вместе в цифровое будущее. Сборник трудов Молодежной школы (Н. Новгород, 25–29 апреля 2022 г.). – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2022. С. 78.
- [3] Краснов А.А., Разин В.В., Золотых Н.Ю. Машинное обучение в задачах диагностики заболевания по ЭКГ на наборе данных PTB-XL // Математика и ИТ – вместе в цифровое будущее. Сборник трудов Молодежной школы (Н. Новгород, 25–29 апреля 2022 г.). – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2022. С. 44.
- [4] Разин В.В., Краснов А.А. Использование искусственного интеллекта в задачах диагностики заболевания по ЭКГ на наборе данных PTB-XL // Путь в науку: прикладная математика, информатика и информационные технологии. Тезисы докладов Всероссийской молодежной научно-практической конференции (Ярославль, 17–21 апреля 2023 г.). – Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2023. С. 93.
- [5] Разин В.В., Краснов А.А. Применение машинного обучения в задачах диагностики заболевания по ЭКГ на наборе данных PTB-XL // Математика и ИТ – вместе в цифровое будущее. Сборник трудов II Молодежной школы (Нижний Новгород, 24–28 апреля 2023 года). – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2023. С. 73.
- [6] Разин В.В., Краснов А.А. Применение глубокого обучения в задачах диагностики заболевания по ЭКГ на наборе данных PTB-XL // Математика и ИТ – вместе в цифровое будущее. Сборник трудов II Молодежной школы (Нижний Новгород, 24–28 апреля 2023 года). – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2023. С. 66.
- [7] Разин В. В., Краснов А. А. Использование глубокого обучения в задачах диагностики заболевания по ЭКГ на наборе данных PTB-XL // Биосистемы: организация, поведение, управление: Тезисы докладов 76-й Всероссийской с международным участием школы-конференции молодых ученых, Нижний Новгород, 11–14 апреля 2023 года. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2023. С. 267.
- [8] Разин В. В., Краснов А. А., Карчков Д. А. Классификация болезней сердца на наборе данных PTB-XL при помощи машинного обучения // Академический форум молодых ученых стран Большой Евразии «Континент науки»: Сборник тезисов докладов, Москва, 01–04 ноября 2023 года. – Москва: Центр научно-технических решений, 2023. С. 570.
- [9] Краснов А. А., Разин В. В., Карчков Д. А. Классификация болезней сердца на наборе данных PTB-XL при помощи глубокого обучения // Академический форум молодых ученых стран Большой Евразии «Континент науки»: Сборник тезисов докладов, Москва, 01–04 ноября 2023 года. – Москва: Центр научно-технических решений, 2023. С. 548.

- [10] Razin V. [et al.]. Determining the presence of heart disease by ecg in the PTB-XL dataset using deep learning // Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии: Труды XXIII Международной конференции, Нижний Новгород, 13–16 ноября 2023 года. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2023. С. 173.
- [11] Beltyukova A. V. et al. The Concept of Hippocampal Activity Restoration Using Artificial Intelligence Technologies // International Conference on Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. P. 240.
- [12] Lebedeva A. et al. Development an intelligent method for restoring hippocampal activity after damage // 2023 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE, 2023. P. 169.
- [13] Разин В. В., Самбунова М. И., Громов Н. В. [и др.] Анализ и предсказание локальных полевых потенциалов для восстановления активности в срезах гиппокампа грызунов с помощью глубокого обучения // XXVIII Нижегородская сессия молодых ученых (гуманитарные, технические, естественные науки): Статьи и тезисы молодых ученых, Нижний Новгород, 05–08 декабря 2023 года. – Нижний Новгород: Издательство "Перо", 2023. С. 269.

## ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТОКОВ ОГРАНИЧЕНИЯ И ТОЛЩИНЫ $\text{Al}_2\text{O}_3$ НА ПАРАМЕТРЫ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ КМОП-СОВМЕСТИМЫХ МЕМРИСТИВНЫХ СТРУКТУР

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

*ННГУ им. Н.И. Лобачевского*

В настоящее время ведутся активные исследования в области мемристорной электроники для создания на ее основе нового типа резистивной памяти и нейроморфных вычислительных систем. Функционирование мемристоров основано на эффекте воспроизводимого резистивного переключения (РП) из состояния с низким сопротивлением (LRS) в состояние с высоким сопротивлением (HRS), т. н. процесс Reset, и обратно, т. н. процесс Set. Для большинства мемристоров характерен процесс РП, связанный с восстановлением и разрушением филаментов –проводящих каналов в диэлектрике [1]. Для успешной интеграции мемристорных устройств в технологический процесс изготовления комплементарных структур «металл-оксид-полупроводник» (КМОП) рабочие напряжения и максимальные токи мемристоров не должны превышать соответствующих параметров управляющих элементов в КМОП-схемах (5 В и 10 мА), а параметры РП должны иметь малый разброс.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование влияния токов ограничения ( $I_{CC}$ ) на параметры РП мемристорных структур на основе стеков  $\text{Ta}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y})/\text{Pt}$  с разными толщинами слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0, 3, 6 и 9 нм). Увеличение токов ограничения приводит к образованию филаментов с более высокой токонесящей способностью и более высокой стабильностью параметров РП [2]. Использование дополнительного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  стабилизирует параметры РП за счет ограничения избыточной диффузии ионов кислорода на границе раздела диэлектрик-металл и уменьшения токов утечки [3].

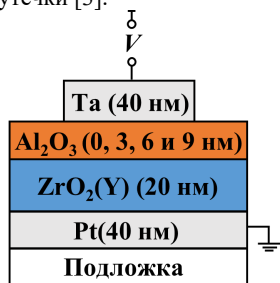


Рис. 1

Исследуемые образцы (рис. 1) представляют собой структуры на основе функционального слоя  $\text{ZrO}_2$  с добавлением 12% мол.  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , а также дополнительного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (толщиной 0, 3, 6 или 9 нм), нанесенных методом магнетронного распыления. Исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) выполнено с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A и зондовой станции Everbeing EB-6. В процессе записи ВАХ обеспечивалось ограничение тока  $I_{CC}$  в диапазоне от 50 до 1000 мкА для предотвращения необратимого пробоя исследуемых структур в процессе Set.

Устройства демонстрируют типичное биполярное РП (рис. 2), при котором процесс Set происходит при положительной полярности приложенного напряжения, в то время как процесс Reset – при отрицательной полярности.

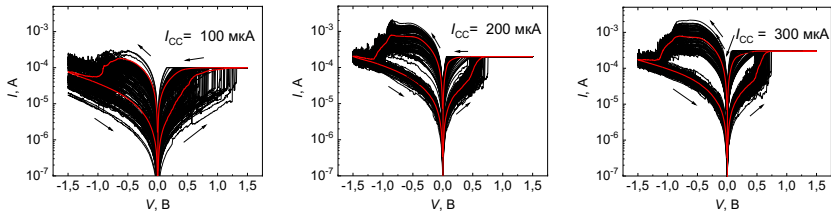


Рис. 2

При  $I_{CC} = 100$  мкА и менее наблюдаются большой разброс токов и пересечение HRS и LRS. Увеличение тока ограничения расширяет зазор между резистивными состояниями.

На основе измеренных ВАХ были построены зависимости токов в LRS и HRS (рис. 3) и напряжений Set и Reset (рис. 4) от тока ограничения.

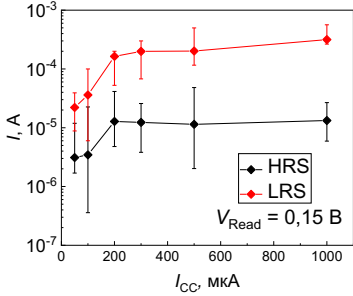


Рис. 3

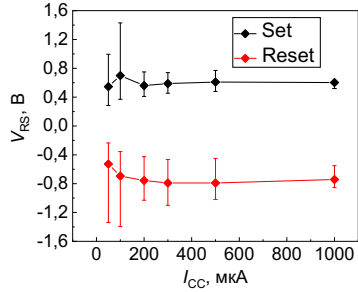


Рис. 4

Пересечение токовых состояний отсутствует уже при  $I_{CC} = 200$  мкА, при этом величина зазора между состояниями LRS и HRS возрастает с увеличением тока ограничения. Разброс токов в резистивных состояниях также возрастает при увеличении тока ограничения, так что оптимальным следует считать использование  $I_{CC} = 200 - 300$  мкА. Напряжения РП незначительно возрастают при увеличении  $I_{CC}$ .

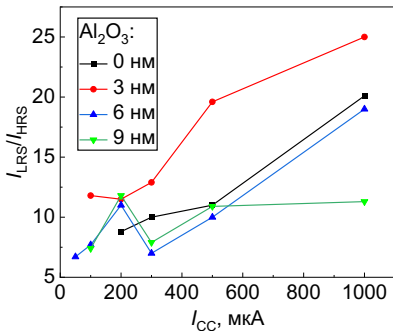


Рис. 5

Зависимость отношения токов  $I_{LRS}/I_{HRS}$  от  $I_{CC}$  имеет немонотонный характер (рис. 5). Однако, начиная с 300 мкА (когда РП становится стабильным), наблюдается рост значения  $I_{LRS}/I_{HRS}$  при увеличении тока ограничения, что дает возможность использовать величину тока ограничения для контроля резистивных состояний. Структуры с разной толщиной  $Al_2O_3$  демонстрировали переход к стабильному РП при разных граничных значениях  $I_{CC}$ : со 100 мкА для 6 нм, с 200 мкА для 0 и 9 нм, с 300 мкА для 3 нм.

На рисунке 6 приведено сравнение ВАХ структур с разными толщинами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (3, 6 и 9 нм) при  $I_{CC} = 300$  мкА. Значения напряжений переключения  $V_{Set}$  и  $V_{Reset}$  и их разброс практически не изменяются с добавлением слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

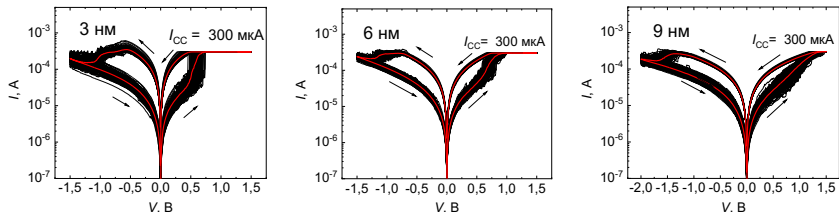


Рис. 6

Увеличение толщины слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  незначительно влияет на средние значения тока через мемристивную структуру, однако существенно уменьшает разброс значений тока, особенно в состоянии LRS (рис. 7).

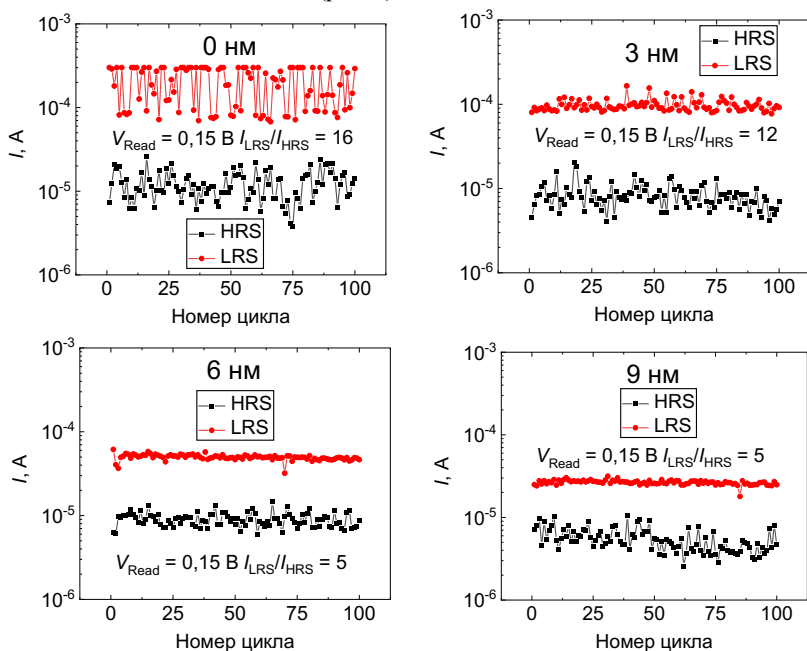


Рис. 7



Предполагается, что к стабилизации параметров РП в двухслойных структурах  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y})$  приводит ограниченная диффузия кислородных вакансий в слое  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Энергии активации миграции ионов кислорода по кислородным вакансиям в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1,3–1,7 эВ [4]) существенно превышает значение для  $\text{ZrO}_2(\text{Y})$  (0,58–0,65 эВ [5]). Поэтому изначально сформированная в процессе электроформовки в двухслойной структуре  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y})$  часть филамента в слое  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не разрушается в процессе Reset (рис. 8), что способствует сохранению места восстановления/разрушения филамента при циклических РП.

С точки зрения минимального энергопотребления мемристорных структур оптимальным является использование тока ограничения 300 мкА. Использование дополнительного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  улучшает стабильность токовых состояний, что наиболее выражено при толщине  $\text{Al}_2\text{O}_3$  6 нм. Максимальные токи, протекающие через мемристор, и рабочие напряжения не превышают 2 мА и  $\pm 1,5$  В, что соответствует требованиям к КМОП-интеграции мемристивных устройств.

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.

- [1] Tran X.A., Yu H.Y., Gao B. et al. // IEEE Electron Device Letters. 2011. Vol. 32. P. 1290.
- [2] Humood K., Saylan S., Mohammad B., Abi jaoude M. // Electronic Materials. 2021. Vol. 50, No. 8. P. 4397.
- [3] Ismail M., Mahata C., Kang M., Kim S. // Nanoscale Research Letters. 2022. Vol. 17. P. 1.
- [4] Nakamura R., Toda T., Tsukui S. et. al. // Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 116. P. 033504.
- [5] Yakimov A.V., Filatov D.O., Gorshkov O.N. et. al. // Applied Physics Letters. 2019. Vol. 114. P. 253506.

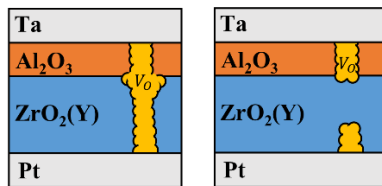


Рис. 8

Секция «Стохастические мультстабильные системы»

Заседание секции проводилось 21 мая 2024 г.  
Сопредседатели – Б. Спаньоло (Италия), А.А. Дубков, секретарь – О.Н. Минаева.  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.