

ВЛИЯНИЕ ШУМА НА РЕЗИСТИВНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ МЕМРИСТОРА НА ОСНОВЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

О. Н. Горшков^{}, Д. О. Филатов, М. Н. Коряжскина, В. А. Лобанова, М. А. Рябова*

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, Нижний Новгород, Россия*

Поступила в редакцию 8 июня 2023 г.,
после переработки 8 июня 2023 г.
Принята к публикации 27 июня 2023 г.

Исследовано влияние гауссова шума на переключение мемристора на основе $ZrO_2(Y)$ из низкорезистивного состояния (НРС) в высокорезистивное состояние (ВРС), включая переход из НРС в промежуточные метастабильные состояния. В качестве переключающих сигналов использовалась последовательность положительных (с добавлением или без добавления шумового сигнала) и отрицательных прямоугольных импульсов напряжения. Добавление шума к переключающему сигналу инициирует переключение мемристора из НРС в ВРС при меньших амплитудах импульсов, чем в случае переключения прямоугольными импульсами без наложения шума. Добавлением шума с определенными параметрами к прямоугольным переключающим импульсам может быть достигнуто необходимое (заданное) ВРС, минуя промежуточные состояния. При этом резистивное переключение реализуется без применения адаптивных протоколов переключения. Результаты настоящего исследования могут быть применены при разработке инновационных протоколов переключения мемристоров.

DOI: 10.31857/S0044451023110123
EDN: PKELZQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Мемристоры являются ключевыми элементами в устройствах нового поколения энергонезависимой памяти — резистивной памяти с произвольным доступом (Resistive Random Access Memory, RRAM) [1]. Начиная с пионерской работы Струкова с сотрудниками [2], мемристоры стали популярным объектом исследования. Разработка надежных элементов RRAM на основе мемристоров с воспроизводимыми и стабильными характеристиками является одной из наиболее актуальных научно-технических задач современных информационных технологий. Однако проблема нестабильности параметров резистивного переключения (РП) мемристоров, в частности напряжений переключения между резистивными состояниями в элементах памяти, ограничивает их широкое практическое внедрение [3]. С од-

ной стороны, разброс параметров РП имеет фундаментальное происхождение, а именно, стохастическая природа процессов, лежащих в основе явления РП [4]. С другой стороны, это также и технологическая проблема, поскольку стохастичность мемристоров зависит от свойств используемых материалов, технологии изготовления мемристорной структуры и от протоколов переключения.

На сегодняшний день в большинстве разработанных конструкций мемристоров реализуется так называемый филаментарный механизм РП, заключающийся в образовании и разрушении проводящих шнуров (филаментов) внутри функционального диэлектрика под действием электрического поля между электродами [5]. В мемристорах на основе оксидов металлов филаменты состоят, как правило, из вакансий кислорода [6], в так называемых мемристорах типа «проводящий мостик» (Conductive Bridge, CB) — из атомов металла, инжектируемых в функциональный диэлектрик из электродов [7]. Обычно переключение мемристора из низкорезистивного состояния (НРС) в высокорезистивное состояние (ВРС) и обратно из ВРС в НРС проходит путем разрушения и восстановления структуры филамен-

^{*} E-mail: gorshkov@nifti.unn.ru

та вблизи границы с химически активным электродом мемристора (на расстоянии около нескольких нм). С другой стороны, толщина (диаметр) филамента может также составлять несколько нм. Таким образом, вне зависимости от размеров самого мемристора, процессы РП происходят в малом объеме (порядка нескольких нм³) в области интерфейса филамента с активным электродом, а в процессе РП принимает участие небольшое (счетное) количество ионов (или вакансий).

При этом каждый прыжок иона на соседнюю вакансию существенно изменяет структуру филамента (и, следовательно, его проводимость). В результате таких прыжков флуктуации электронного тока мемристора как в НРС, так и в ВРС могут значительно превышать соответствующие средние значения.

Ранее Стотланд с сотрудниками предложили инновационный подход повышения стабилизации параметров РП, основанный на использовании эффекта конструктивной роли шума в мультстабильных стохастических системах [8]. В рамках данного подхода мемристор рассматривается как бистабильная (или мультстабильная) стохастическая система, которая может быть описана на основе модели броуновского движения частиц в бистабильном (или мультстабильном) потенциале. Самый простой случай — бистабильный потенциал, рассмотренный Крамерсом [9]. Действительно, ряд эффектов, присущих мультстабильным стохастическим системам, наблюдался в мемристорах экспериментально. В их числе переключение между ВРС и НРС в режиме случайного телеграфного сигнала под действием внешнего гауссова «белого» шума [10], стохастический резонанс [11], резонансная активация переключения между НРС и ВРС под действием внешнего периодического сигнала [12], переходная бимодальность [13], а также эффект увеличения времени релаксации резистивного состояния мемристора при переключении из НРС в ВРС под действием внутреннего (термического) [14] и внешнего [15] шума. В работах [16, 17] было показано, что добавление к переключающему импульсу напряжения гауссова шума с определенным стандартным отклонением увеличивает разницу сопротивлений между LRS и HRS мемристора.

В настоящей работе экспериментально исследовано влияние добавления к прямоугольным переключающим импульсам шумового сигнала, имитирующего гауссов «белый» шум, на изменение резистивного состояния мемристора на основе структуры Ta(40 нм)/ZrO₂(Y)(20 нм)/Pt(20 нм) в ходе пере-

ключения из НРС в ВРС (так называемый процесс RESET), включая переход из НРС в промежуточные метастабильные состояния. Исследовано влияние параметров переключающих импульсов (амплитуды V_{offset} и длительности t_p импульсов), а также интенсивности шума σ на напряжение переключения из НРС в ВРС, отношение значений силы тока в НРС и ВРС и др.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследовались лабораторные макеты мемристоров на основе структуры металл–изолятор–металл Au(20 нм)/Ta(40 нм)/ZrO₂(Y)(20 нм)/Pt(20 нм)/Ti(5 нм), нанесенной методом магнетронного распыления на стандартную подложку p-Si(001) с предварительно нанесенным слоем SiO₂ толщиной 700 нм. Использовалась вакуумная установка для осаждения тонких пленок Torr International 2G1-1G2-EB4-TN1. Пленки ZrO₂(Y) наносились методом высокочастотного магнетронного распыления мишени, спрессованной из смеси порошков ZrO₂ (88% мол.) и Y₂O₃ (12% мол.), при температуре подложки $T_g = 250^\circ\text{C}$. Металлические контакты наносились методом магнетронного распыления на постоянном токе при $T_g = 200^\circ\text{C}$. Мемристорные структуры типа кросс-пойнт с размерами активной области $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ формировались стандартным методом фотолитографии с использованием фотолитографической линейки производства НПО «Планар» (Беларусь).

Подробнее методика изготовления мемристоров, а также результаты измерений их электрических параметров изложены в [15].

Исследования влияния шума на РП проводились при помощи USB модуля АЦП/ЦАП National Instruments USB ADC/DAC 6341 под управлением программного обеспечения LabVIEW. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1а. Электрические контакты к контактным площадкам мемристоров обеспечивались с помощью зондовой станции EverBeing EB-6. Электрические характеристики исследованных мемристоров были измерены с использованием анализатора параметров полупроводниковых устройств Agilent B1500A. Ток ограничения был 300 мкА при $V[B] < 0$. Циклические вольт–амперные характеристики (ВАХ) после формовки представлены на рис. 2а.

В эксперименте на мемристор подавалась последовательность чередующихся положительных (с добавлением или без добавления шума) и отри-

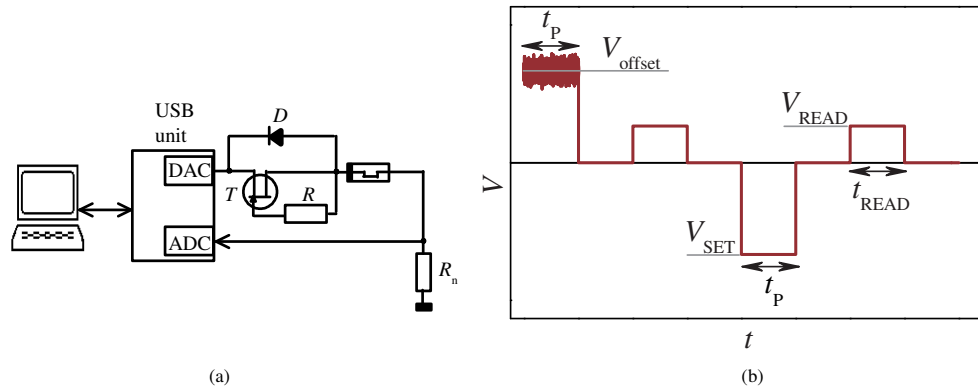


Рис. 1. Схемы экспериментальной установки (a) и единичного цикла переключающего сигнала $V(t)$ (b)

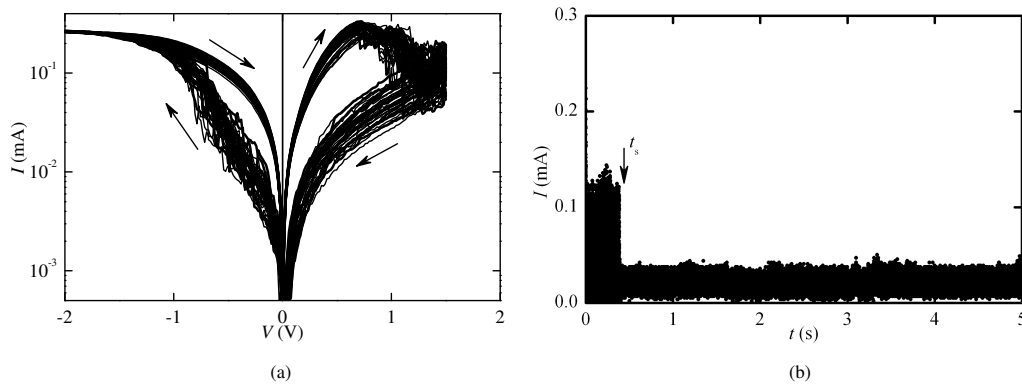


Рис. 2. Циклические ВАХ лабораторного макета мемристора (a); осциллограмма тока, протекающего через мемристор $I(t)$ в ходе переключения из НРС в ВРС при наложении шума на прямоугольный переключающий импульс (b).
 $V_{\text{offset}} = 1.0 \text{ В}$, $\sigma = 66 \text{ мВ}$

пательных прямоугольных импульсов напряжения (рис. 1b). Значение V_{offset} (равное амплитуде положительных переключающих импульсов без добавления шума) варьировалось от 0.6 В до 1.5 В. Выбранные значения V_{offset} охватывают диапазон напряжений от напряжения начала плавного процесса RESET (см. рис. 2a) до напряжения полного переключения из НРС в ВРС V_{RESET} . В случае переключения импульсами с добавлением шума интенсивность шума σ варьировалась от 0.05 В до 0.3 В. Амплитуда отрицательных импульсов напряжения, переключающих мемристор из ВРС обратно в НРС (так называемый процесс SET), была фиксированной: $V_{\text{SET}} = -2 \text{ В}$. Следует отметить, что в настоящей работе изучалось влияние шума только на процесс RESET, включая переход из НРС к некоторым промежуточным метастабильным состояниям между НРС и ВРС. Длительность положительных и отрицательных импульсов t_P варьировалась от 10 мкс до 5 мс. В рамках одного исследования

длительности положительных и отрицательных импульсов были равны друг другу. После каждого положительного и отрицательного импульсов измерялась сила тока через мемристор путем подачи импульсов чтения амплитудой $V_{\text{READ}} = 0.4 \text{ В}$ и длительностью $t_{\text{READ}} = 0.1 \text{ мс}$.

Случайный сигнал, имитирующий гауссов «белый» шум, был синтезирован в цифровом виде следующим образом. С использованием встроенного генератора псевдослучайных чисел программного обеспечения LabVIEW был сгенерирован массив случайных чисел с гауссовым распределением для заданного значения σ . Для генерации импульса переключения с шумом этот массив был добавлен к последовательности прямоугольных импульсов переключения. Затем полученный массив отправлялся в ЦАП USB модуля с частотой выдачи $f_0 = 2 \text{ МГц}$.

Синтезированный описанным выше образом переключающий сигнал подавался на исследуемый мемристор, последовательно подключенный к на-

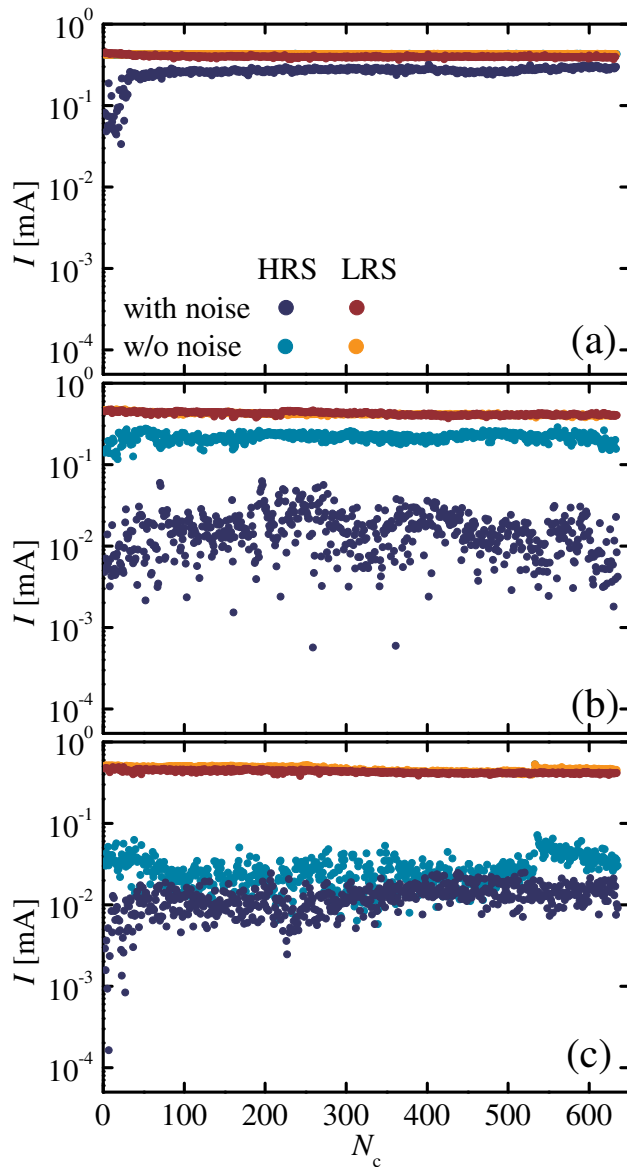


Рис. 3. Диаграммы выносливости мемристора для случая переключения прямоугольными импульсами с наложением шума и без. $V_{\text{offset}} = 1.0$ (a), 1.2 (b), 1.4 (c) В, $\sigma = 0.2$ В, $t_p = 10$ мкс

грузочному сопротивлению $R_n = 100$ Ом (рис. 1a). Измеряемый сигнал (пропорциональный силе тока I , протекающего через мемристор) снимался с нагрузочного резистора и направлялся на вход АЦП USB модуля. Частота дискретизации АЦП была установлена равной f_0 . Перед началом каждого измерения мемристор переводился в начальное проводящее состояние (НРС). Затем измерялся отклик мемристора на переключающий сигнал при заданных значениях V_{offset} , σ и t_p . На рис. 2b приведен пример осциллограммы тока через мемристор $I(t)$

в процессе перехода мемристора из НРС в ВРС под действием импульса с добавлением шума. При $t < t_s$ мемристор находится в исходном состоянии (НРС); усредненное по этому интервалу времени значение $\langle I(t) \rangle = I_{\text{ON}}$. Момент времени $t = t_s$ соответствует переходу из НРС в ВРС. При $t > t_s$ мемристор остается в ВРС; соответственно, $\langle I(t) \rangle = I_{\text{OFF}}$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 показан пример диаграммы выносливости (зависимости I_{ON} и I_{OFF} от количества циклов переключений N_c) при переключении прямоугольными импульсами с добавлением и без добавления шума.

Наложение шума приводит к уменьшению среднего значения I_{OFF} при равных значениях V_{offset} . Отношение $I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$, соответственно, возрастает. На рис. 4 показаны зависимости отношения $I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$ от V_{offset} при переключении прямоугольными импульсами с добавлением и без добавления шума для различных значений t_p . Пороговое значение V_{offset} , необходимое для изменения резистивного состояния мемристора (включая переключение из НРС в ВРС), уменьшается при переключении импульсами с добавлением шума по сравнению с переключением без шума.

Увеличение t_p также приводит к уменьшению порогового значения напряжения V_{offset} , при котором происходит изменение резистивного состояния мемристора. Например, в случае переключения с наложением шума, при $t_p = 10$ мкс переход в менее проводящее состояние происходит при $V_{\text{offset}} = 1.0$ В, а при $t_p = 50$ мкс — при $V_{\text{offset}} = 0.8$ В (ср. рис. 4a, b). Влияние t_p на характеристики процесса RESET может быть объяснено с учетом известного соотношения, называемого «дилемма напряжение–время» («voltage–time dilemma» [18]):

$$V_s \times \tau_s \sim A_s, \tag{1}$$

где V_s и τ_s — амплитуда и длительность переключающего импульса соответственно, A_s — константа. В соответствии с (1), чем больше амплитуда переключающего импульса V_s , тем меньше время требуется для переключения мемристора.

Эффект уменьшения порогового значения V_{offset} , необходимого для изменения резистивного состояния, с ростом t_p можно объяснить с точки зрения

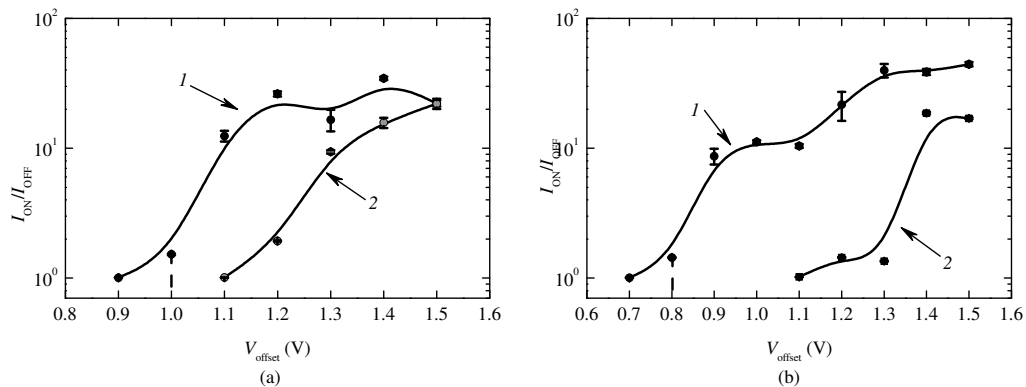


Рис. 4. Зависимости отношения I_{ON}/I_{OFF} от V_{offset} для случая переключения прямоугольными импульсами с наложением (1) и без наложения (2) шума. $\sigma = 0.2$ (1), 0 (2) В, $t_P = 10$ (a), 50 (b) мкс

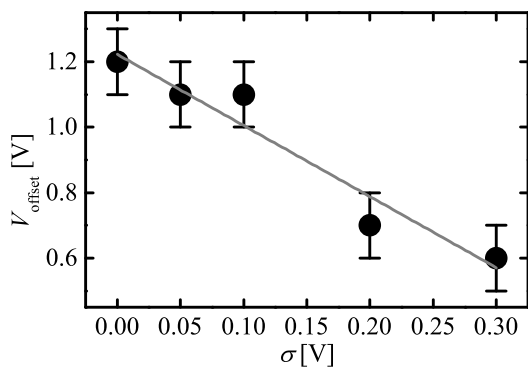


Рис. 5. Зависимость порогового значения V_{offset} , необходимого для переключения мемристора, от σ ; $t_P = 5$ мс

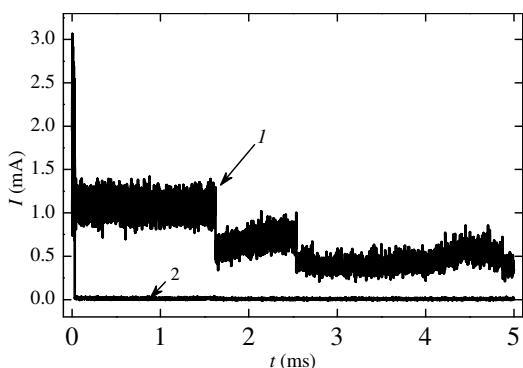


Рис. 6. Осциллограммы $I(t)$, демонстрирующие процесс перехода мемристора из НРС в промежуточные метастабильные состояния (включая процесс RESET), при подаче прямоугольных переключающих импульсов с наложением шума. $\sigma = 0.1$ (1), 0.3 (2), $V_{offset} = 1.0$ В, $t_P = 5$ мс

энергии, необходимой для изменения сопротивления мемристора (разрушения филамента):

$$E = \int_0^{t_P} I(t)V(t)dt, \quad (2)$$

где $V(t)$ — напряжение, приложенное к мемристор. Представим $V(t)$ в виде

$$V(t) = V_{offset} + G(t),$$

где $G(t)$ — случайный сигнал (шум). Пренебрегая нелинейностью ВАХ мемристора, с учетом закона Ома $I(t) = V(t)/R$, где R — сопротивление филамента, выражение (2) можно записать в виде

$$E = \int_0^{t_P} \frac{V_{offset} + G(t)}{R} (V_{offset} + G(t)) dt = \int_0^{t_P} \left(\frac{V_{offset}^2}{R} + \frac{2V_{offset}G(t)}{R} + \frac{G(t)^2}{R} \right) dt. \quad (3)$$

Если $G(t)$ — гауссов шум, то второе слагаемое в подынтегральном выражении в (3) обращается в нуль, поскольку распределение Гаусса симметрично относительно $V = 0$ В. Остальные два слагаемых представляют собой вклады от постоянной и шумовой компонент переключающего импульса соответственно.

Далее, в соответствии с рис. 2b, можно разделить интервал интегрирования в (3) $[0, t_P]$ на две части: $[0, t_s]$ и $[t_s, t_P]$:

$$R = \begin{cases} R_{ON}, & 0 < t < t_s, \\ R_{OFF}, & t_s < t < t_P, \end{cases} \quad (4)$$

где R_{ON} и R_{OFF} — сопротивления филамента в НРС и ВРС соответственно. Полагая $R_{\text{ON}} \ll R_{\text{OFF}}$, интервал интегрирования в (3) можно принять равным $[0, t_s]$. Далее, полагая R_{ON} постоянным на интервале $[0, t_s]$, получаем

$$E \approx (V_{\text{offset}}^2 + \sigma^2) \frac{t_s}{R_{\text{ON}}}. \quad (5)$$

В проведенном эксперименте $V_{\text{offset}}^2 \gg \sigma^2$. Тем не менее эффект от добавления шума при относительно малых значениях σ был весьма заметен. Было установлено, что при увеличении значения σ требуются меньшие значения V_{offset} для изменения сопротивления мемристора (см. рис. 5).

При определенных значениях V_{offset} и σ в случае переключения прямоугольными импульсами с добавлением шума наблюдается переход мемристора в промежуточные метастабильные резистивные состояния (рис. 6, кривая 1). Эти состояния соответствуют области плавного процесса RESET на циклических ВАХ (см. рис. 2а). Необходимо отметить, что указанные выше промежуточные метастабильные состояния мемристора могут быть индуцированы самим шумовым сигналом. Ранее в [10] сообщалось о модификации метастабильных состояний мемристора внешним шумом, которая описывается в рамках концепции мультипликативного шума. В то же время при достаточно большой величине σ наблюдается переход мемристора непосредственно в ВРС с высокими значениями R_{OFF} , минуя все метастабильные состояния (рис. 6, кривая 2).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящего исследования демонстрируют, что добавление гауссова «белого» шума с определенными параметрами к прямоугольным импульсам напряжения, переключающим мемристор из НРС в ВРС, приводит к значительному уменьшению пороговой амплитуды прямоугольного импульса V_{offset} , необходимой для переключения, по сравнению с переключением прямоугольными импульсами без наложения шума. Кроме того, пороговое значение V_{offset} для перехода из НРС в ВРС уменьшается с увеличением интенсивности шума σ и длительности прямоугольного импульса t_p . Отношение $I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$ при фиксированных значениях V_{offset} в присутствии шума больше, чем в его отсутствие, и

возрастает с увеличением σ . При относительно малых значениях σ переключающие импульсы с наложением шума переводят мемристор в метастабильные промежуточные резистивные состояния между НРС и ВРС, связанные с областью плавного процесса RESET на ВАХ мемристора. Напротив, при относительно больших значениях σ мемристор переходит непосредственно в ВРС с относительно высоким и стабильным сопротивлением, минуя промежуточные состояния. Добавлением шума с определенными параметрами к прямоугольным переключающим импульсам может быть достигнуто необходимое (заданное) ВРС, минуя промежуточные состояния.

Результаты настоящего исследования могут быть применены при разработке инновационных протоколов переключения мемристоров.

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 исследований изготовлены в Лаборатории мемристорной наноэлектроники, созданной в рамках Государственного задания FSWR-2022-0009 на создание новых лабораторий для электронной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. H. Lee, X. Zhu, and W. D. Lu, Nano Res. **13**, 1228 (2020).
2. D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, Nat. Mater. **80**, 453 (2008).
3. D. Ielmini, Semicond. Sci. Technol. **31**, 063002 (2016).
4. J. S. Lee, S. Lee, and T. W. Noh, Appl. Phys. Rev. **2**, 031303 (2015).
5. I. Riess, J. Electroceram. **39**, 61 (2017).
6. A. Sawa, Mater. Today **11**, 28 (2008).
7. Z. Wang, H. Wu, G. W. Burr et al., Nat. Rev. Mater. **5**, 173 (2020).
8. A. Stotland and M. di Ventra, Phys. Rev. E **85**, 011116 (2012).
9. H. A. Kramers, Physica (Utrecht) **7**, 284 (1940).

10. D. O. Filatov, D. V. Vrzheshech, O. V. Tabakov et al., *J. Stat. Mech. Theory Exp.* 124026 (2019).
11. A. N. Mikhaylov, D. V. Guseinov, A. I. Belov et al., *Chaos, Solitons & Fractals* **144**, 110723 (2021).
12. M. A. Ryabova, D. O. Filatov, M. N. Koriazhkina et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **1851**, 012003 (2021).
13. N. V. Agudov, A. A. Dubkov, A. V. Safonov et al., *Chaos, Solutions and Fractals* **150**, 111131(2021).
14. D. O. Filatov, M. N. Koryazhkina, A. S. Novikov et al., *Chaos, Solitons, & Fractals* **156**, 111810 (2022).
15. M. N. Koryazhkina, D. O. Filatov, V. A. Shishmakova et al., *Chaos, Solutions & Fractals* **162**, 112459 (2022).
16. G. A. Patterson, P. I. Fierens, and D. F. Grosz, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 074102 (2013).
17. V. Ntinis, A. Rubio, G. Ch. Sirakoulis et al., *IEEE Trans. Circuits and Systems II* **68**, 1378 (2021).
18. S. Menzel, U. Bottger, M. Wimmer, and M. Salanga, *Adv. Func. Mater.* **25**, 6306 (2015).