

Труды XXIX научной конференции по радиофизике

**СЕКЦИЯ
«СТОХАСТИЧЕСКИЕ МУЛЬТИСТАБИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»**

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

ВЛИЯНИЕ ШУМА НА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ МЕМРИСТОРА В ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ

Д.О. Филатов, М.Н. Коряжкина, И.Н. Антонов

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

В [1] была экспериментально исследована кинетика процесса переключения мемристоров на основе структуры Ta/ZrO₂(Y)/Pt из состояния с низким сопротивлением (СНС) в состояние с высоким сопротивлением (СВС) прямоугольными импульсами напряжения с наложением белого гауссовского шума. Было установлено, что при определённых параметрах переключающих импульсов (амплитуда импульса V_m , интенсивность шума σ), мемристор переключается из СНС в СВС, последовательно переходя через несколько промежуточных (между СНС и СВС) резистивных состояний. Пример подобной кинетики переключения приведён на рис. 1 (чёрная кривая). Напротив, при увеличении V_m и уменьшении σ наблюдается переключение мемристора из СНС непосредственно в СВС, минуя промежуточные состояния (рис. 1, красная кривая).

Результаты, полученные в работе [1], можно объяснить на основе модели движения броуновской частицы в мультстабильном потенциале [2]. В рамках этой модели, динамика мемристора может быть описана уравнением Ланжевена для броуновской частицы в бистабильном (или мультстабильном) эффективном потенциале $U(x)$, где x — обобщённая координата частицы, характеризующая состояние мемристора.

В настоящей работе проведено математическое моделирование процесса переключения мемристора при наложении на переключающие импульсы белого гауссовского шума. Решали уравнение Ланжевена

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} U(x) + \vartheta(t) \quad (1)$$

для модельного потенциала $U(x)$, содержащего пять одинаковых потенциальных ям с равноотстоящими локальными минимумами (англ. washboardpotential – потенциал вида «стиральная доска») в постоянном силовом поле $F = -\partial U/\partial x$ (рис. 2):

$$U(x) = -Fx - \ln \left\{ \sum_{k=1}^5 \exp \left[-\frac{(x - c_k)^2}{2w^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

где w — ширина потенциальных ям, c_k — координаты минимумов потенциальных ям, $\vartheta(t)$ — величина случайной силы, действующей на броуновскую частицу, имеющая гауссово распределение с полушириной на полувысоте σ , t — время.

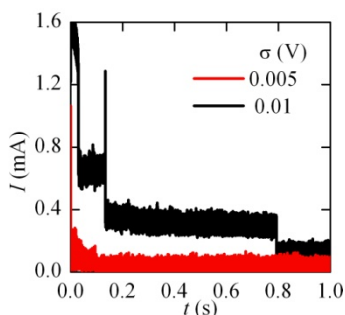


Рис. 1

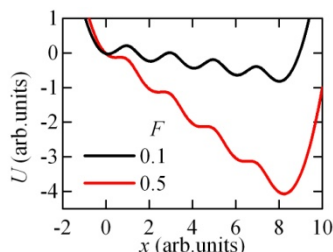


Рис. 2

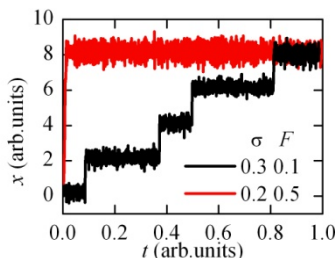


Рис. 3

В качестве обобщенной координаты x выбиралось сопротивление мемристора R . Уравнение (1) решалось численно методом Рунге-Кутты. Предполагалось, что при $t = 0$ частица находится в крайней левой яме: $x = x_1 = 0$.

На рис. 3 представлены модельные зависимости $x(t)$, рассчитанные для различных значений F и σ . При $F = 0.1$ и $\sigma = 0.3$, частица, первоначально находящаяся в левой крайней яме (соответствующей СНС), переходит в крайнюю правую яму (соответствующую СВС), последовательно проходя через все промежуточные ямы, соответствующие промежуточным резистивным состояниям мемристора (рис. 3, чёрная кривая). Соответствующий профиль $U(x)$ приведен на рис. 2 (чёрная кривая). Напротив, при $F = 0.5$ и $\sigma = 0.3$, частица переходит из левой крайней ямы в крайнюю правую, практически не задерживаясь в промежуточных ямах (рис. 3, красная кривая). Соответствующий профиль $U(x)$ приведен на рис. 2 (красная кривая). Заметим, что при указанном значении F потенциальные ямы практически исчезают вследствие понижения потенциальных барьеров, разделяющих ямы, во внешнем поле. С другой стороны, при относительно малых значениях σ воздействие на частицу случайной силы $\vartheta(t)$ мало по сравнению с полем F .

Результаты настоящей работы показывают, что закономерности переключения мемристора на основе структуры Ta/ZrO₂(Y)/Pt из СНС в СВС импульсами напряжения с наложением шума, обнаруженные экспериментально, могут быть объяснены на основании модели динамики классической броуновской частицы в мультстабильном потенциале. Результаты работы могут быть применены при разработке методов управления резистивным состоянием мемристоров в нейроморфных вычислительных устройствах.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № FSWR-2025-0006. Экспериментальные исследования выполнены с использованием ресурсов Учебного дизайн-центра электроники Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

- [1] Горшков О.Н., Филатов Д.О., Коряжкина М.Н., Лобанова В.А., Рябова М.А. // ЖЭТФ. 2023. Т. 164, № 5. С. 810.
- [2] Wang Z., Joshi S., Savel'ev S.E., Jiang H., Midya R., Lin P., Hu M., Ge N., Strachan J.P., Li Z., Wu Q., Barnell M., Li G.-L., Xin H.L., Williams R.S., Xia Q., Yang J.J. // Nature Materials. 2017. Vol. 16. P. 101.

ОТКЛИК МЕМРИСТИВНОГО УСТРОЙСТВА НА НЕЙРОНАЛЬНУЮ АКТИВНОСТЬ ГИППОКАМПА ГРЫЗУНОВ *IN VIVO*

М.Н. Коряжкина¹⁾, Д.Д. Пахомова¹⁾, А.В. Лебедева¹⁾, Д.А. Исаев¹⁾, А.П. Колобова¹⁾,
Е.Д. Будылина¹⁾, А.И. Белов¹⁾, И.Н. Антонов¹⁾, Ю.Ю. Агарков²⁾, А.Н. Михайлов¹⁾

¹⁾ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

²⁾ ООО «Поликетон»

Современные достижения в области нейропротезирования открывают новые возможности как для восстановления утраченных функций нервной системы, так и для лечения нейродегенеративных заболеваний [1]. Однако с развитием технологий нейропротезирования возникает необходимость в создании более энергоэффективных, адаптивных, компактных и надежных устройств. Мемристоры, обладая уникальными свойствами хранения и обработки информации, могут эффективно имитировать функции биологических нейронов и синапсов [2], что делает их перспективными элементами для разработки современных нейропротезов.

Несмотря на значительные преимущества, до сих пор существует счетное количество работ, посвященных влиянию нейрональной активности на отклик мемристивного устройства [3]. Тем не менее, актуальность и важность данной задачи обусловлены в первую очередь *необходимостью* обеспечения безопасности при взаимодействии мемристоров с нервной системой. Понимание механизмов такого взаимодействия важно для разработки нейропротезов, которые не только эффективно интегрируются в биологические системы, но и минимизируют риски, связанные с возможными побочными эффектами.

Данная работа посвящена результатам исследования влияния нейрональной активности гиппокампа грызунов, полученной *in vivo* (в целом мозге), на отклик мемристивного устройства на основе стека $\text{Ta}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y})/\text{Pt}$ и его резистивное состояние.

Детальную информацию о технологии изготовления мемристивного устройства и схематическое изображение экспериментальной установки можно найти в [4, 5]. Исследования были реализованы при помощи зондовой станции Everbeing EB-6 и многофункционального устройства ввода-вывода National Instruments USB-6361.

В данном исследовании протоколы всех экспериментов были рассмотрены и одобрены Биоэтическим комитетом Института Биологии и Биомедицины Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Для регистрации нейрональной активности использованы самцы крыс стока Wistar в возрасте 1-2 месяца без патологий, полученные в Центре генетических коллекций лабораторных животных ННГУ. Все животные получали пищу и воду *ad libitum* и содержались при 12-часовом световом цикле. Перед регистрацией нейрональной активности осуществлялась хирургическая операция по имплантации внеклеточных электродов в область CA1 гиппокампа испытуемых крыс с последующим реабилитационным периодом. Регистрация нейрональной активности *in vivo* осуществлялась с помощью системы Open Ephys следующим образом. Животное помещалось в поведенческую установку «открытое поле», в которой проводилась регистрация ритмической внеклеточной активности гиппокампа, представляющей собой локальные полевые потенциалы, в

течение 180 с. Для оценки точности попадания регистрирующих электродов в область CA1 гиппокампа проводился гистологический анализ.

Затем амплитуда нейрональной активности увеличивалась так, чтобы ее максимальное и минимальное значения по порядку величины соответствовали напряжениям изменения резистивного состояния мемристивного устройства, определяемым по его вольтамперным характеристикам (рис. 1). Пример результирующей нейрональной активности показан на рис. 2. Стоит отметить, что типичные распределения нейрональной активности имели форму гауссианы с нулевым средним, а кривые спектральной плотности мощности (СПМ) имели особенности в области частот, соответствующих θ - и γ -ритмам мозга.

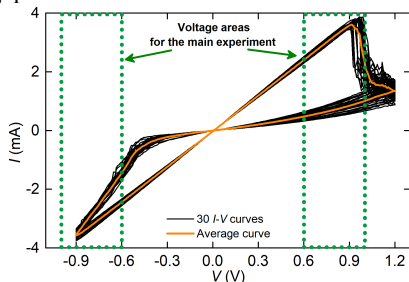


Рис. 1

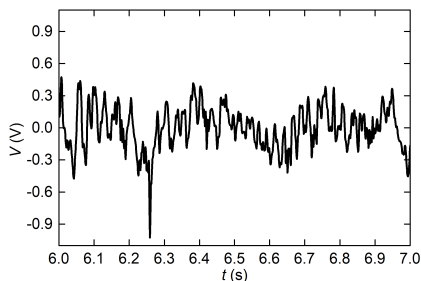


Рис. 2

Определение влияния нейрональной активности на резистивное состояние мемристивного устройства осуществлялось путем приложения импульсов чтения амплитудой $+0,2$ В и длительностью 5 мс. Чтение осуществлялось до и после приложения нейрональной активности, а также каждую секунду при приложении нейрональной активности. Полученные записи нейрональной активности подавались на мемристор в течение 10 секунд. При каждом наборе параметров нейрональной активности всего было записано по 10 откликов мемристивного устройства.

На рис. 3 и 4 представлены типичные зависимости тока через мемристивное устройство, регистрируемого при приложении импульсов чтения, от числа чтений для 10 откликов и усредненные кривые, соответственно. Данные, показанные на рис. 3, получены при амплитуде нейрональной активности, равной ± 1 В.

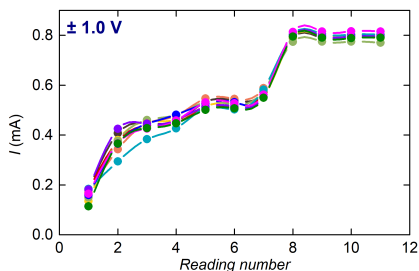


Рис. 3

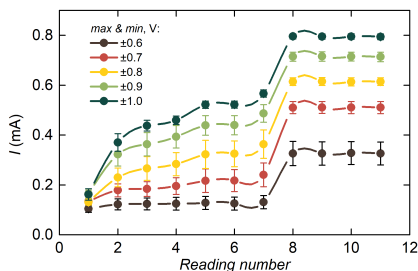


Рис. 4

Обнаружено, что даже при низких амплитудах с каждой секундой приложение нейрональной активности приводит к увеличению проводимости мемристового устройства. Демонстрируемое поведение похоже на проявление синаптической пластичности. Следует отметить, что воздействие нейронной активности между 7 и 8 чтениями, что соответствует приложению нейрональной активности между 6 и 7 секундами, привело к резкому увеличению тока через мемристовое устройство. Этот эффект будет более подробно рассмотрен ниже.

На рис. 5 и 6 показаны типичные зависимости тока от времени для 10 откликов мемристового устройства, полученные при амплитуде нейрональной активности, равной $\pm 0,7$ и ± 1 В, соответственно. Видно, что разброс кривых до и после пунктирной линии разный. Причем эффект зависит от параметров нейрональной активности.

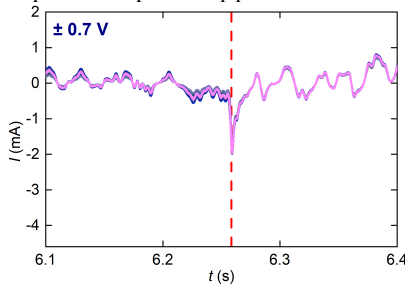


Рис. 5

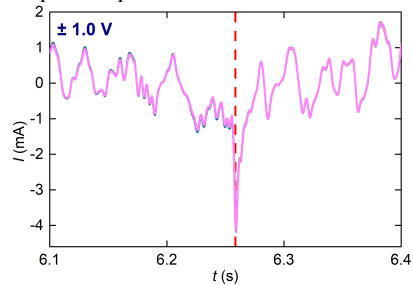


Рис. 6

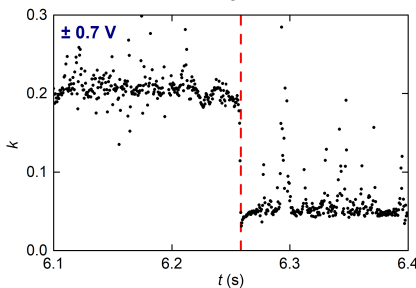


Рис. 7

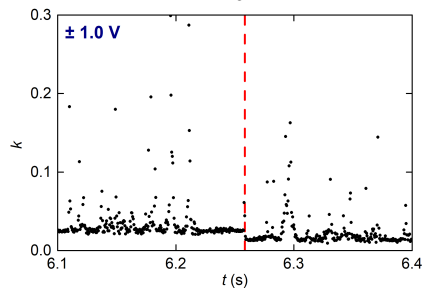


Рис. 8

Для количественной оценки эффекта были вычислены зависимости коэффициента вариации от времени (рис. 7 и 8). Видно, что при амплитуде нейрональной активности, равной $\pm 0,7$ В, коэффициент вариации изменяется в ~ 4 раза, в то время как при амплитуде, равной ± 1 В, он изменяется в $\sim 1,7$ раз. Предполагается, что обнаруженный эффект связан с различиями в разбросе разных резистивных состояний [6].

На рис. 9 показаны кривые СПМ, полученные из усредненных осциллограмм тока через мемристовое устройство. Видно, что значительного изменения в форме кривых в зависимости от параметров нейрональной активности не наблюдается.

На рис. 10 показаны нормализованные кривые СПМ, полученные из усредненных осциллограмм тока через мемристовое устройство и входного сигнала (нейрональной активности). Обнаружено, что нормализованные кривые не только не зависят от

параметров нейрональной активности, но и не отличается от кривой СПМ, полученной для самой нейрональной активности.

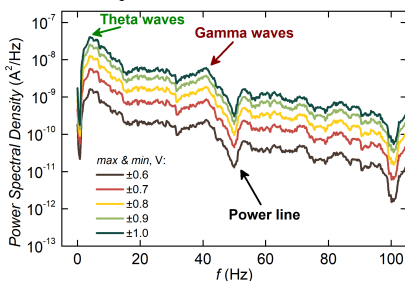


Рис. 9

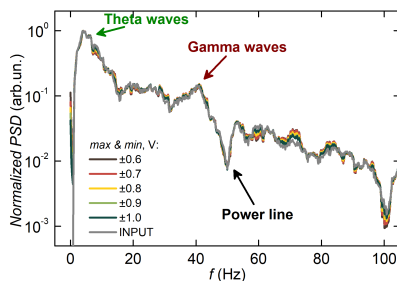


Рис. 10

Таким образом, показано, что даже кратковременное воздействие нейрональной активности *in vivo* малой амплитуды может существенно изменить проводимость мемристового устройства. Обнаружено изменение коэффициента вариации кривых отклика мемристового устройства. Причем эффект существенно зависел от параметров нейрональной активности. Показано, что кривые спектральной плотности мощности отклика мемристового устройства не зависели от параметров нейрональной активности и повторяли соответствующую кривую, полученную для самой нейрональной активности. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности мемристовых устройств на основе $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y})$ для эффективного обнаружения и подавления аномальных (эпилептических) всплесков нейрональной активности *in vivo* без изменения частотных характеристик самой активности.

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

- [1] Awuah W.A., Ahluwalia A., Darko K. et al. // World Neurosurgery. 2024. Vol. 189. P. 138.
- [2] Chen S., Zhang T., Tappertzhofen S. et al. // Advanced Materials. 2023. Vol. 35. P. 2301924.
- [3] Sbandati C., Stathopoulos S., Foster P. et al. // Science Advances. 2024. Vol. 10. P. eadp7613.
- [4] Kruglov A.V., Serov D.A., Belov A.I. et al. // Technical Physics. 2024. Vol. 69. P. 1698.
- [5] Koryazhkina M.N., Lebedeva A.V., Pakhomova D.D. et al. // Chaos, Solitons & Fractals. 2025. Vol. 191. P. 115959.
- [6] Koryazhkina M.N., Filatov D.O., Shishmakova V.A. et al. // Chaos, Solitons & Fractals. 2022. Vol. 162. P. 112459.

АНАЛИЗ ВАХ МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР $P\text{-Si}/P\text{-Ge}/n^+\text{-Si}(001)$ С Ag -ЭЛЕКТРОДОМ

Д.О. Филатов, О.Н. Горшков, А.В. Ключев, А.В. Якимов

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

В работе [1] изучены созданные лабораторные макеты мемристоров на основе структур $p\text{-Si}/p\text{-Ge}/n^+\text{-Si}(001)$ с верхним электродом из Ag . Дислокации несоответствия, образующиеся на границе $\text{Ge}/\text{Si}(001)$, реагируя друг с другом, прорастают через слой Ge и далее в слой высокоомного $p\text{-Si}$ ($p < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). На поверхности слоя $p\text{-Si}$ методом селективного химического травления формировались лунки, декорирующие места выхода прорастающих дислокаций на поверхность. Лунки травления, заполненные серебром, являются концентраторами электрического поля в активном слое мемристора, что стимулирует дрейф ионов серебра вдоль прорастающих дислокаций.

За счёт формирования анизотипного гетероперехода $p\text{-Ge}/n^+\text{-Si}$ слой $p\text{-Ge}$ полностью обеднён дырками.

Мемристоры продемонстрировали биполярное резистивное переключение (РП), наблюдающееся на фоне асимметричных вольтамперных характеристик (ВАХ), обусловленных наличием анизотипного гетероперехода. На рис. 1 представлена ВАХ мемристора после электроформовки; на вставке показана схема структуры. На рис. 2 изображены циклические ВАХ, усредненные по 30 циклам РП; указаны значения сопротивлений при напряжениях -1 В и $+1 \text{ В}$ для состояний высокого и низкого сопротивлений соответственно.

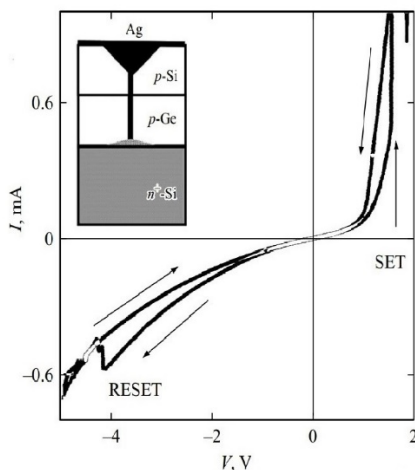


Рис. 1

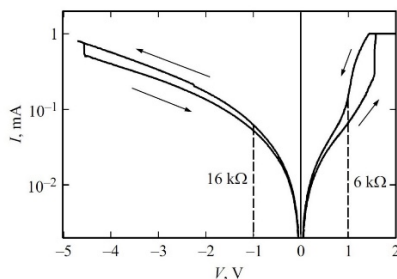


Рис. 2

SET-процесс происходил при $V > 0$, а RESET-процесс — при $V < 0$.

Наиболее вероятным механизмом RESET-процесса представляется разрыв филамента за счёт диффузионного выхода атомов Ag в окружающую матрицу на произвольном участке дислокации в области наибольшего разогрева или в дислокационные петли вблизи интерфейса $p\text{-Ge}/n^+\text{-Si}$. При этом $V_{\text{SET}} \sim 1.5$ В, $|V_{\text{RESET}}| \sim 4.6$ В.

Измерения ВАХ проводились по следующей схеме.

Положительные и отрицательные части для каждого скана снимались попарно. Развёртка по напряжению V в обоих случаях осуществлялась от нуля в сторону увеличения модуля напряжения и обратно: положительная $0 \rightarrow V_{\text{max}} \rightarrow 0$, отрицательная $0 \rightarrow V_{\text{min}} \rightarrow 0$, и так далее для следующего скана. Всего обработано 7 пар сканов.

Здесь приводятся данные для двух парных сканов “IVSweep275V46” (положительная ветвь) и “IVSweep27V146” (отрицательная ветвь). Каждый скан содержит по 2000 отсчётов, сделанных последовательно в прямом и обратном направлении.

Начнём с анализа положительной ветви, см. рисунки 3 и 4. Нижняя кривая “1” соответствует увеличению напряжения V от нуля до V_{max} ; верхняя “2” – от V_{max} до нуля. Судя по нижней кривой, можно предположить, что происходит восстановление филамента, вплоть до замыкания обоих контактов при $V \approx 1.77$ В. При этом ток I скачкообразно принимает предустановленное значение 1 мА. Из ВАХ для верхней кривой следует, что филамент восстановлен полностью.

При анализе положительной ветви ВАХ использовались следующие уравнения.

Полный ток I есть сумма тока через филамент I_f и тока I_D внутреннего диода D.

$$I = I_f + I_D. \quad (1)$$

Ток I_f определяется напряжением V и сопротивлением филамента R_f .

$$I_f = V/R_f. \quad (2)$$

Ток внутреннего диода I_D описывается стандартной характеристикой:

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right) - 1 \right]. \quad (3)$$

Здесь I_s – ток насыщения, n – коэффициент неидеальности, V_T – тепловой потенциал. Напряжение V_D определяется с учётом внутреннего сопротивления базы диода и его контактов R_s :

$$V_D = V - R_s I_D. \quad (4)$$

При обработке нижней кривой “1” анализировались первые 862 точки ВАХ, то есть до полного восстановления филамента, но до начала переходных процессов, рис. 3. Такой же диапазон использован для моделирующих функций.

При моделировании использовались следующие параметры: $R_f = 30$ кОм; $I_s = 18$ мкА; $n = 11$; $R_s = 1$ Ом; $V_T = 25$ мВ. Относительная среднеквадратическая ошибка во всём диапазоне анализируемых токов составила примерно 9.5 процентов.

При обработке верхней кривой “2” анализировались последние 803 точки ВАХ, то есть после полного восстановления филамента и окончания переходных процессов, рис. 4. Такой же диапазон использован для моделирующих функций.

При моделировании использовались следующие параметры: $R_f = 18$ кОм; $I_s = 2.5$ нА; $n = 3.5$; $R_s = 700$ Ом; $V_T = 25$ мВ. Относительная среднеквадратическая ошибка во всём диапазоне анализируемых токов составила примерно 9.6 процентов.

На рисунках 3 и 4 показаны следующие компоненты тока. Чёрные линии “Measured” – экспериментальные данные. Красные линии “Modelled” – результат моделирования ВАХ соотношением (1). Зелёные линии “ I_f ” – ток филамента (2). Коричневые линии “ I_D ” – ток внутреннего диода (3) с учётом падения напряжения (4) на внутреннем сопротивлении R_s базы диода и его контактов.

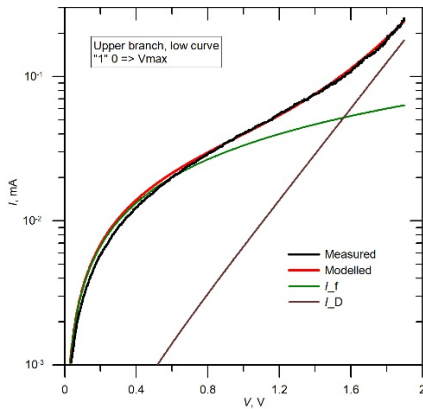


Рис. 3

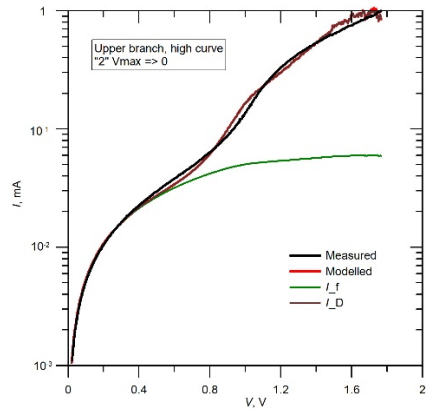


Рис. 4

Перейдём к анализу отрицательной ветви ВАХ, состояние высокого сопротивления. Анализируется файл “IVSweep27V146”, рисунки 5 и 6. Эти данные, по модулю, примерно в шесть раз превышают усреднённую ВАХ, представленную на рис. 2. Осуществим раздельный анализ верхней и нижней кривых ВАХ.

Верхняя кривая “3” соответствует убыванию напряжения V от нуля до $V_{\min}$. На этом участке происходит частичное разрушение филамента при $V \approx -5$ В, рис. 5. Анализовались первые 927 точек ВАХ, то есть до начала переходных процессов. Такой же диапазон использован для моделирующих функций.

При анализе использовалась эмпирическая формула:

$$I(V) = \frac{V}{R_f} + CV^2. \quad (5)$$

Здесь $R_f = 20$ кОм – сопротивление филамента, как и при анализе верхней кривой положительной ветви ВАХ из скана “IVSweep275V46”. Второй член в правой части (5) – квадратичная поправка, $C = -2 \times 10^{-5}$ А/В². Физическая природа этой поправки пока не понятна. Относительная среднеквадратическая ошибка во всём диапазоне анализируемых токов составила примерно 12 процентов.

Нижняя кривая “4” соответствует увеличению напряжения V от $V_{\min}$ до нуля, рис. 6. Анализовались последние точки ВАХ, от 990 до 2000, то есть после частичного

разрушения филамента и окончания переходных процессов. Такой же диапазон использован для моделирующих функций.

Здесь использованы следующие аппроксимирующие параметры.

Сопротивление филамента $R_f = 80$ кОм, что в четыре раза превышает сопротивление, использованное для моделирования верхней кривой “3”. Коэффициент, определяющий квадратичную поправку к току, равен $C = -1.7 \times 10^{-5} \text{ A/B}^2$, что несколько меньше значения, использованного для моделирования кривой “3”. Относительная среднеквадратическая ошибка во всём диапазоне анализируемых токов составила примерно 16 процентов.

На рисунках 5 и 6 показаны следующие компоненты тока. Чёрные линии “Measured” – экспериментальные данные. Красные линии “Modelled” – результат моделирования ВАХ соотношением (5). Зелёные линии “ I_f ” – линейная компонента тока, первое слагаемое в правой части (5). Фиолетовые линии “Delta I quadr” – квадратичная поправка в моделируемом токе.

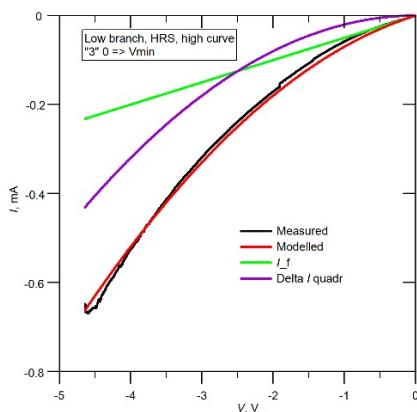


Рис. 5

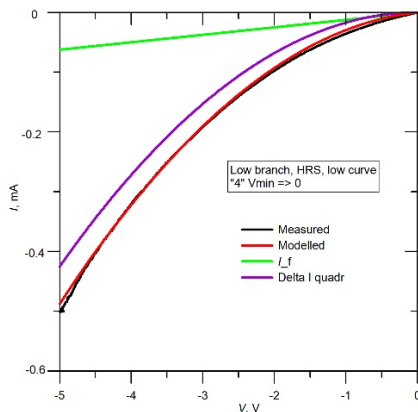


Рис. 6

Представленные результаты предназначены для диагностики мемристорных систем, включая определение параметров ВАХ внутреннего гетероперехода, и моделирования динамики их резистивного переключения.

Работа выполнена при реализации научно-исследовательской и образовательной политики университета в области физики и радиофизики в рамках реализации программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”.

- [1] Филатов Д.О., Горшков О.Н., Шенгуров В.Г., Денисов С.А., Шенина М.Е., Котомина В.Е., Антонов И.Н., Круглов А.В. // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49, вып. 1. С. 5. DOI: 10.21883/PJTF.2023.01.54048.19367.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВАХ ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕМРИСТОРА

А.В. Клубков, Е.А. Денисова, А.А. Клубкова, Н.В. Агудов, А.А. Дубков,
А.И. Белов, Д.И. Большаков

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Одной из ключевых проблем при построении моделей мемристоров является наличие множества подгоночных параметров, значения которых требуется подбирать на основе экспериментальных данных. Но методы подбора, как правило, неизвестны.

В частности, ранее была разработана стохастическая модель мемристора [1], представленная ниже в виде системы (1), где уравнение Ланжевена описывает стохастическую динамику изменения длины проводящего филамента y , а второе уравнение описывает нелинейную функцию ВАХ – зависимость протекающего через мемристор тока I от напряжения на контактах V и y [2]:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = -\frac{\partial U_{eff}(y, V)}{\partial y} + \xi(t), \\ I(y, V) = \left(\frac{y}{L}\right)^n c_1 \sinh(c_2 V) + c_3 (e^{c_4 V} - 1), \end{cases} \quad (1)$$

где $U_{eff} = -v_{eff}(V)y$ – эффективный потенциальный профиль, который в простейшем случае представляет собой линейную функцию от y , v_{eff} – наклон потенциального профиля или коэффициент дрейфа, $\xi(t)$ – белый гауссовский шум с $\langle \xi(t) \rangle = 0$ и $\langle \xi(t)\xi(t+\tau) \rangle = 2D_{eff}\delta(\tau)$, L – длина мемристора, c_1, c_2, c_3, c_4, n – подгоночные параметры ВАХ. В данной системе используются отражающие граничные условия, которые позволяют длине филамента оставаться в диапазоне $[0; L]$.

Как видно, в модели есть большое количество подгоночных и неизвестных параметров: $v_{eff}, D_{eff}, c_1, c_2, c_3, c_4, n$, что делает их отыскание нетривиальным. Это затрудняет широкое применение модели для расчетов без проведения дополнительной калибровки по специально разработанной методике.

Цель данной работы заключается в разработке методики измерений, позволяющей на основе экспериментальных данных вычислять подгоночные параметры токовой модели. В дальнейшем данные параметры позволят по известной из эксперимента токовой зависимости $I(y, V, t)$ восстановить динамику длины филамента $y(I, V, t)$, что является необходимым этапом для последующей оценки параметров уравнения Ланжевена v_{eff} и D_{eff} .

Как следует из уравнения (1), ток, протекающий через мемристор в каждый момент времени, представлен суперпозицией токов, соответствующих состоянию высокого сопротивления (СВС) и состоянию низкого сопротивления (СНС). В связи с этим данное выражение может быть переписано в виде:

$$I(y, V) = \left(\frac{y}{L}\right)^n I_{СНС}(V, c_1, c_2) + I_{СВС}(V, c_3, c_4). \quad (2)$$

В данной работе предлагается алгоритм, который позволяет оценить подгоночные параметры токовой модели, полагаясь на физические законы. Алгоритм включает следующие этапы:

1. Разделение ВАХ на две ветви, соответствующие СНС и СВС.
2. Предварительная оценка параметров $\hat{c}_1, \hat{c}_2, \hat{c}_3, \hat{c}_4$ для каждой ветви отдельно. Полученные значения служат в качестве начального приближения для многомерной оптимизации. Начальные приближения для параметров $\frac{\bar{y}_{\text{СВС}}}{L} = 0.8$, $\frac{\bar{y}_{\text{СНС}}}{L} = 1$ и $\hat{n} = 20$ соответствуют оценкам, приведенным в других работах [3].
3. Многомерная оптимизация параметров, выполняемая на основе предварительной оценки, полученной на предыдущем этапе. Этот шаг позволяет уточнить параметры модели, при этом качество оптимизации существенно зависит от выбранного начального приближения.

Разделение ВАХ на ветви может быть выполнено на основе того, что в СВС в уравнении (2) будет доминировать второе слагаемое, что следует из начальных оценок для $\frac{\bar{y}_{\text{СВС}}}{L}$ и $\hat{n}$:

$$I(y, V) \approx c_3(e^{c_4 V} - 1). \quad (3)$$

При достаточно высоких напряжениях, таких, что $e^{c_4 V} \gg 1$ единиц в выражении (3) можно пренебречь:

$$I_{\text{СВС}} = c_3(e^{c_4 V} - 1) \approx c_3 e^{c_4 V}. \quad (4)$$

Полученное уравнение может быть линеаризовано с помощью логарифмирования:

$$\ln I_{\text{СВС}} = \ln c_3 + c_4 V. \quad (5)$$

Таким образом, задача нахождения коэффициентов c_3 и c_4 сводится к решению задачи линейной регрессии, из которой коэффициент c_4 может быть определён как наклон кривой (обозначим за k), а $\ln c_3$ как смещение (обозначим за b). Тогда оценочные коэффициенты c_3 и c_4 могут быть записаны следующим образом:

$$\hat{c}_3 = e^b, \hat{c}_4 = k. \quad (6)$$

Визуализация алгоритма для СВС продемонстрирована на рис. 1.

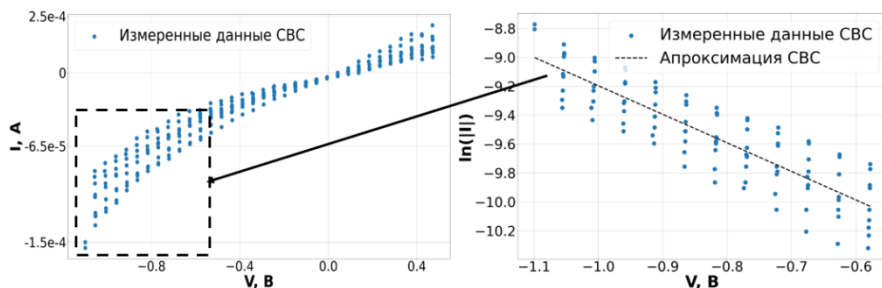


Рис. 1

Для СНС уравнение можно записать следующим образом, используя практическую оценку $\frac{\bar{y}_{\text{СНС}}}{L} = 1$:

$$I_{\text{СНС}}(y, V) = I(y, V) - \hat{c}_3(e^{\hat{c}_4 V} - 1) \approx c_1 \sinh(c_2 V). \quad (7)$$

Применяя в (7) разложение в ряд Тейлора, его можно переписать следующим образом:

$$I_{\text{СНС}}(y, V) = c_1 \left(c_2 V + \frac{(c_2 V)^3}{3!} + \dots \right) \approx h_1 V + h_2 V^3. \quad (8)$$

Неизвестные коэффициенты h_1 и h_2 могут быть оценены с помощью метода наименьших квадратов, после чего коэффициенты c_1 и c_2 могут быть найдены из системы:

$$\hat{c}_1 = \sqrt{\frac{h_1^3}{6h_2}}, \hat{c}_2 = \sqrt{\frac{6h_2}{h_1}}. \quad (9)$$

На рис. 2 продемонстрированы результаты аппроксимации для СНС.

Далее более точные значения коэффициентов ($y_{\text{СНС}}, y_{\text{СВС}}, c_1, c_2, c_3, c_4, n$) вычисляются в соответствии с экспериментальными данными с помощью методов многомерной оптимизации, исходя из начальных значений ($\widehat{y}_{\text{СНС}}, \widehat{y}_{\text{СВС}}, \widehat{c}_1, \widehat{c}_2, \widehat{c}_3, \widehat{c}_4, \widehat{n}$). Финальный этап позволяет уточнить и согласовать коэффициенты, найденные на двух разных ветвях ВАХ, так как до этого оценка коэффициентов производилась независимо.

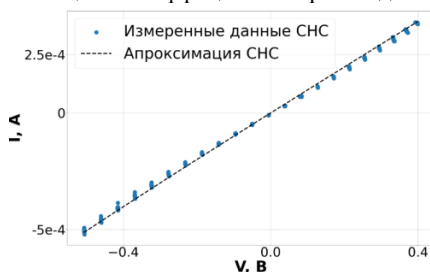


Рис. 2

Результаты вычисления параметров для одного набора экспериментальных данных показаны на рис. 3, а значения параметров приведены в таблице. Из полученных результатов видно, что данная модель хорошо описывает ВАХ в СНС и СВС и отражает физические свойства мемристора в каждом из состояний.

Табл.

n	$y_{\text{СВС}}$	$y_{\text{СНС}}$	c_1	c_2	c_3	c_4
20.2	0.9	1	3.5e-2	3.1e-2	-4.7e-6	-3.7

Для анализа алгоритма было рассмотрено 20 экспериментов по аппроксимации ВАХ с помощью предложенной методики и для каждого эксперимента была рассчитана относительная среднеквадратичная ошибка (ОСКО) по следующей формуле:

$$\text{ОСКО} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i^{\text{эксперимент}} - I_i^{\text{модель}})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i^{\text{эксперимент}}}. \quad (4)$$

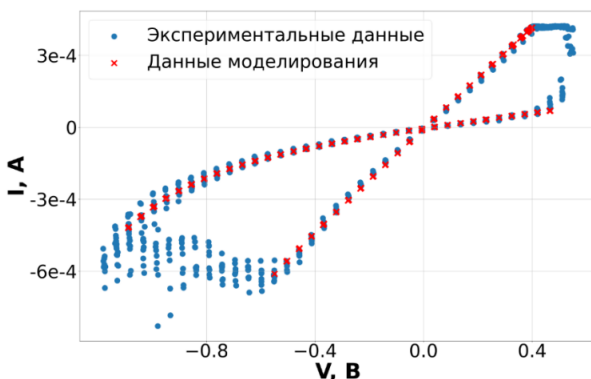


Рис. 3

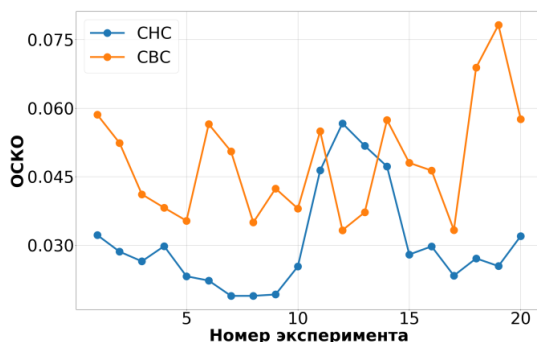


Рис. 4

На рис. 4 изображена зависимость ОСКО от номера эксперимента для СВС и СНС в отдельности, ОСКО для всех экспериментов варьируется в диапазоне от 2% до 10%, что демонстрирует хорошее качество описания экспериментальных данных с помощью предложенной методики для всех 20 экспериментов.

- [1] Agudov N.V. et al. // Chaos, Solitons&Fractals. 2021. Vol. 150. P. 111131.
- [2] Yang J.J. et al. // Nat. Nanotechnol. 2008. Vol. 3. P 429.
- [3] Филатов Д.О., Сорочкина Е.Д., Антонов Д.А., Антонов И.Н., Горшков О.Н. // НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. XXIX симпозиум (Н. Новгород, 10–14 марта 2025 г.): Тезисы докладов. – Н. Новгород, 2025. С. 488.

Секция «Стохастические мультстабильные системы»

Заседание секции проводилось 21 мая 2025 г.
Сопредседатели – Б. Спаньолю (Италия), А.А. Дубков, секретарь – Е.Ю. Линник.
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.