

УДК 621.793.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕМРИСТОРНОГО ЭФФЕКТА В КРОССБАР-АРХИТЕКТУРЕ ДЛЯ НЕЙРОМОРФНЫХ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

© 2024 г. В. В. Полякова<sup>а, \*</sup>, А. В. Саенко<sup>а</sup>, И. Н. Коц<sup>а</sup>, А. В. Ковалев<sup>а</sup><sup>а</sup>Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

\*E-mail: vpolyakova@sfedu.ru

Поступила в редакцию 26.10.2023 г.

После доработки 10.11.2023 г.

Принята к публикации 10.11.2023 г.

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований структур, сформированных на основе кроссбар-архитектуры мемристорных структур из различных материалов. В качестве рабочего мемристорного слоя был использован  $TiO_2$ . В качестве материала для контактных площадок были использованы: Al, Ni, Cr, Mo, Ta, Ag. В ходе проведения экспериментальных исследований было выявлено оптимальное сочетание материалов для формирования кроссбар мемристорных структур, которые в дальнейшем могут быть использованы в устройствах нейроморфных систем искусственного интеллекта.

*Ключевые слова:* мемристор, кроссбар-архитектура, нейроморфные системы, магнетронное напыление, атомно-силовая микроскопия

DOI: 10.31857/S0544126924010069

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из перспективных направлений научно-технического прогресса является развитие и реализация искусственного интеллекта на основе нейронных сетей [1]. Основные задачи, на которые ориентированы нейронные сети, состоят в обработке большого количества данных, реализации машинного обучения и самообучения, а также в распознавании изображений и речи. Современная архитектура фон Неймана, применяемая для решения указанных задач, где память и обработка информации физически разделены, испытывает огромные трудности, в то время как мозг человека работает доли секунд с незначительными энергозатратами — во много раз меньше современных компьютеров [2].

Однако для реализации новой элементной базы нейронных сетей необходимо решить ряд задач. Во-первых, разработать элементы памяти с многоуровневым переключением, которые могут использоваться в нейронных сетях в качестве искусственных аналогов синапсов. Во-вторых, требуется создать быстродействующую энергонезависимую флэш-память большого объема, способную сохранять информацию в течение не менее 10 лет при высокой температуре. В-третьих, нужно разработать универсальную память, которая объединяет высокую скорость работы и возможность

многократного перепрограммирования, энергонезависимость флэш-памяти, большую емкость для хранения информации и низкую стоимость.

Для решения всех перечисленных задач мемристоры, сформированные на основе кроссбар-архитектуры, являются многообещающим и перспективным. Мемристорные структуры представляют собой диэлектрическую пленку между двумя металлическими контактами, имеющую обратимый переход между различным сопротивлением при протекании импульса тока. Однако для понимания физики процессов, происходящих в контакте между материалами мемристорного слоя, необходимо проводить исследования для разработки и поиска наиболее подходящих материалов с наилучшими рабочими параметрами мемристорных структур [3].

На сегодняшний день существует множество способов формирования мемристорного слоя, но из-за очень маленького размера мемристорных структур, а также преимущества в возможности контролировать полученные структуры, нами был выбран метод локального анодного окисления (ЛАО) с помощью атомно-силового микроскопа. Метод ЛАО позволяет формировать оксидные наноразмерные структуры различных материалов [4, 5, 6]. Полученные таким образом структуры могут обладать заданными параметрами и свойствами.

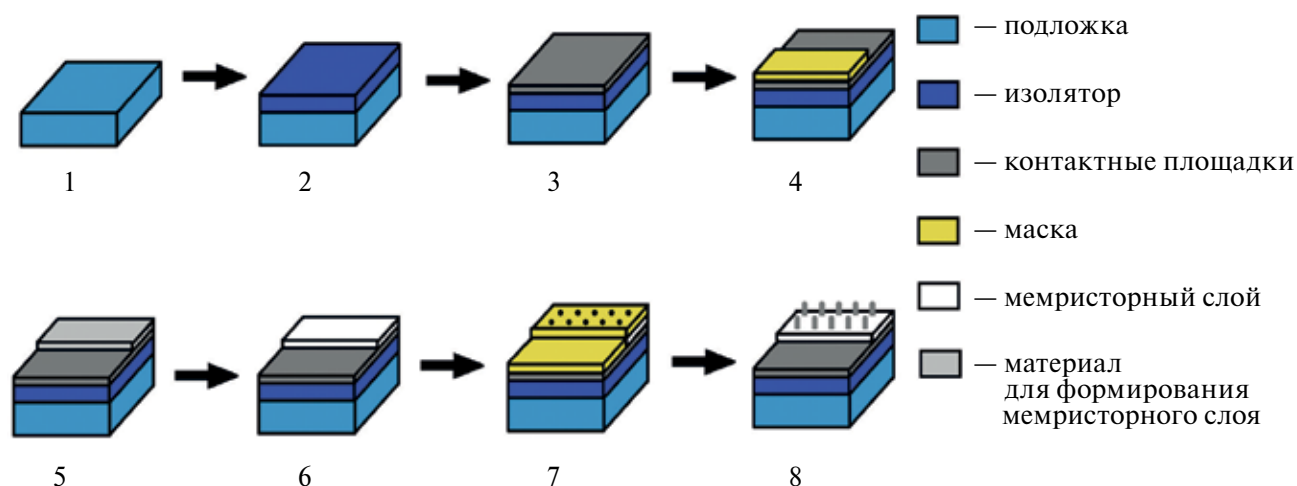


Рис. 1. Технологический маршрут формирования кроссбар-архитектуры.

В работе [6] с помощью метода ЛАО было показано, что оксид титана, сформированный таким образом, проявляет мемристорный эффект. Поскольку данный материал совместим с КМОП-технологией, он имеет параметры быстродействия для  $\text{TiO}_2 < 5 \text{ нс}$  [7], воспроизводимость количества циклов  $\text{TiO}_2 > 2 \times 10^6$  [8], что является решающими факторами при разработке и реализации мемристорной структуры, поэтому в нашей работе  $\text{TiO}_2$  был использован в качестве рабочего мемристорного слоя для построения кроссбар-структуры.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 приведен разработанный авторами технологический маршрут изготовления кроссбар-архитектуры мемристорных структур.

Цифрой 1 показана подложка кремния, цифрой 2 — подложка после напыления оксида кремния, которое проводилось методом магнетронного распыления на настольной вакуумной установке магнетронного напыления VSE-PVD-DESK-PRO (ООО “АкадемВак”). Внешний вид установки представлен на рис. 2. Изолирующий слой толщиной  $(70 \pm 5) \text{ нм}$  формировался на указанной установке 210 мин при мощности 75 Вт, давлении  $5 \times 10^{-3}$  мбар и температуре  $120^\circ\text{C}$ . Затем (также методом магнетронного распыления) по всей поверхности наносился слой нижнего контакта из Ti. Время напыления составило 1 мин, давление —  $5 \times 10^{-3}$  мбар, температура —  $120^\circ\text{C}$  и мощность — 200 Вт. Таким образом, формировался нижний контакт толщиной  $(20 \pm 5) \text{ нм}$ . Цифрой 4 на рис. 1 показана маска, которой закрывался образец для нанесения Ti, а цифрой 5 — ступенька из Ti, сформированная магнетронным



Рис. 2. Настольная вакуумная установка магнетронного напыления VSE-PVD-DESK-PRO.



Рис. 3. Зондовый микроскоп Solver P47 PRO.

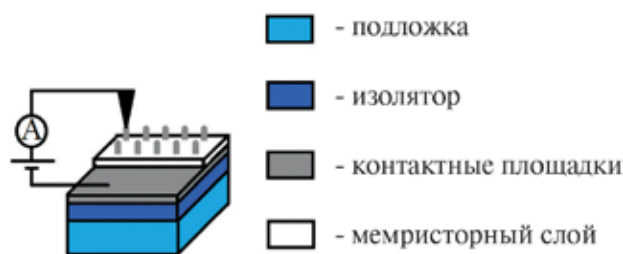


Рис. 4. Схема измерения ВАХ макета кроссбар мемристорных структур.

распылением за время напыления 0.5 мин при давлении  $5 \times 10^{-3}$  мбар, температуре  $120^\circ\text{C}$  и мощности 200 Вт. Таким образом, был сформирован слой толщиной  $(10 \pm 5)$  нм.

На рис. 1 под номером 6 (белым цветом) показан сформированный мемристорный слой. Его формирование проводилось с помощью зондового микроскопа Solver P47 PRO (ЗАО «НТ-МДТ», Россия) (рис. 3). Методом ЛАО по поверхности титана в контактном режиме АСМ с кантилеверами NSG 10 с проводящим покрытием Pt была проведена нанолитография. АСМ проводился со следующими параметрами: амплитуда импульсов напряжения составляла 10 В, длительность импульсов напряжения — 100 мс, частота колебаний зонда — 0.03 Гц, ток цепи обратной связи (в программе управления PNL параметр Set Point) — 0.3 нА. Относительная

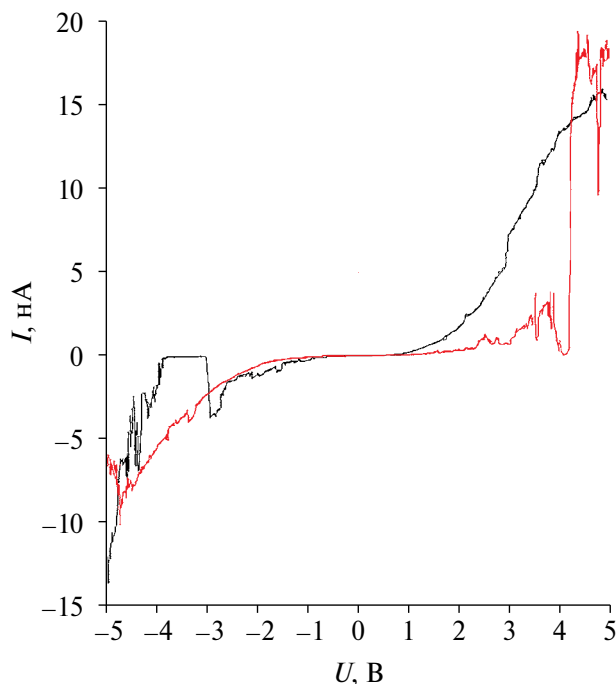


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики структуры Si/SiO<sub>2</sub>/Ti/TiO<sub>2</sub>/Al.

влажность воздуха при ЛАО контролировалась влагомером Oregon Scientific ETHG913R и варьировалась в диапазоне  $(50 \pm 1)\%$ . В результате был сформирован мемристорный слой.

Цифрой 7 на рис. 1 показано, как с помощью маски проводилось формирование слоя верхних контактов. Напыление металлов в качестве верхнего контакта производилось также на установке МВУ ТМ МАГНА 01 при давлении  $5 \times 10^{-3}$  мбар и температуре  $120^\circ\text{C}$ . При этом: для Al мощность при напылении составила 200 Вт, а время — 0.5 мин; для Ni мощность при напылении составила 200 Вт, а время — 0.5 мин; для Cr мощность при напылении составила 150 Вт, а время — 0.45 мин; для Mo мощность при напылении составила 150 Вт, а время — 0.45 мин; для Ta мощность при напылении составила 150 Вт, а время — 0.45 мин; для Ag мощность при напылении составила 150 Вт, а время — 1 мин.

Цифрой 8 на рис. 1 показан сформированный макет рабочих тестовых образцов кроссбар-архитектуры мемристорных структур с мемристорным слоем из TiO<sub>2</sub> с различными материалами верхнего контакта. Таким образом было изготовлено шесть макетов структур: Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Al, Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Ni, Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Cr, Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Mo, Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Ta, Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Ag.

Далее были исследованы электрические характеристики шестиизготовленных макетов структур с помощью зондового микроскопа Solver P47 PRO.

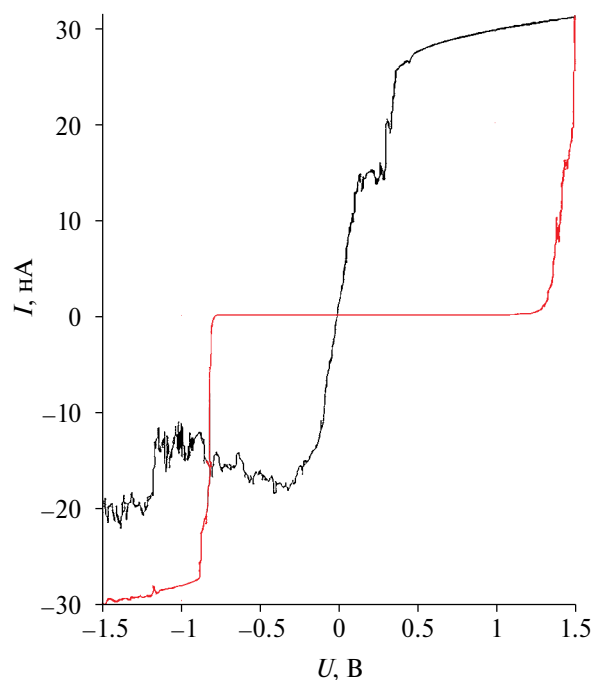


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики структуры Si/SiO<sub>2</sub>/Ti/TiO<sub>2</sub>/Ni.

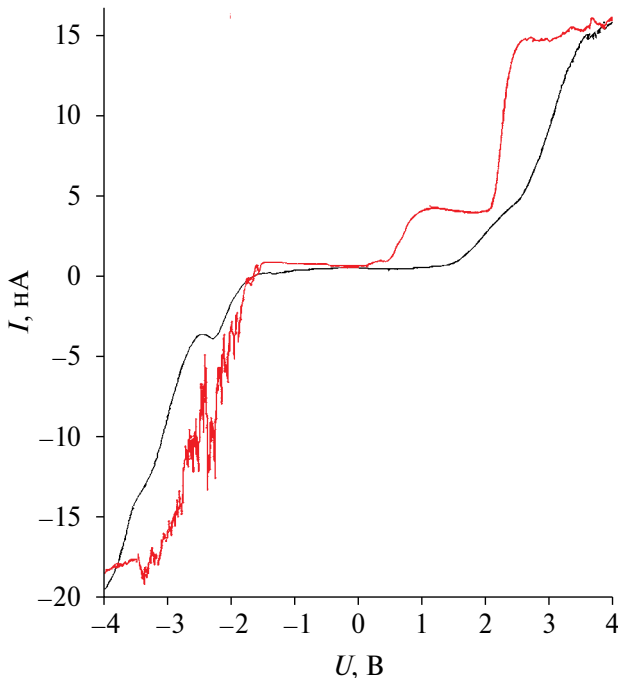


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики структуры Si/SiO<sub>2</sub>/Ti/TiO<sub>2</sub>/Cr.

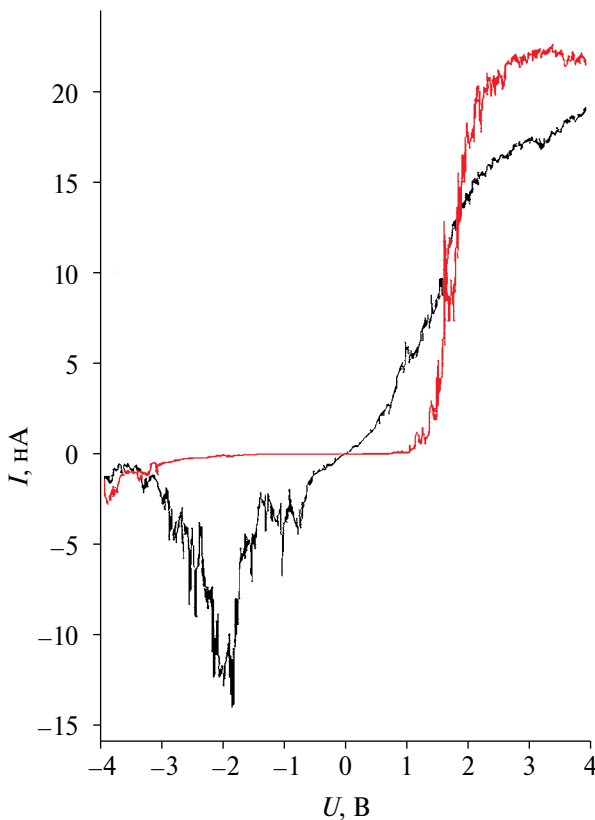


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики структуры Si/SiO<sub>2</sub>/Ti/TiO<sub>2</sub>/Mo.

Измерения параметров и характеристик макетов сформированных структур производилось методом АСМ в контактном режиме. На рис. 4 приведена электрическая схема получения вольт-амперных характеристик (ВАХ) исследуемых кроссбар-структур.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная ВАХ кроссбар-мемристорных структур Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Al представлена на рис. 5.

Измерение параметров структуры Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Al проводилось в контактном режиме при подаче импульсов напряжения от -5 до 5 В. Напряжение записи  $U_{\text{set}}$  составило 4.1 В при токе 14 нА. Напряжение сброса  $U_{\text{res}} = -3$  В при токе -2.5 нА.

Вольт-амперная характеристика кроссбар-мемристорных структур Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Ni показана на рис. 6.

Измерение параметров структуры Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Ni проводилось в контактном режиме при подаче импульсов напряжения от -1.5 до 1.5 В. Напряжение записи  $U_{\text{set}}$  составило 1.5 В при токе 26 нА. Напряжение сброса  $U_{\text{res}} = -0.8$  В при токе -28 нА.

Вольт-амперная характеристика кроссбар-мемристорных структур Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Cr изображена на рис. 7.

Измерение параметров структуры Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Cr проводилось в контактном режиме при подаче импульсов напряжения от -4 до 4 В. Напряжение записи  $U_{\text{set}}$  составило 3.8 В при токе 14 нА. Напряжение сброса  $U_{\text{res}} = -3.8$  В при токе -18 нА.

Вольт-амперная характеристика кроссбар-мемристорных структур Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Mo приведена на рис. 8.

Измерение параметров структуры Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Mo проводилось в контактном режиме при подаче импульсов напряжения от -4 до 4 В. Напряжение записи  $U_{\text{set}}$  составило 1.8 В при токе 10 нА. Напряжение сброса  $U_{\text{res}} = -3$  В при токе -1.1 нА.

Вольт-амперная характеристика кроссбар-мемристорных структур Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Ta показана на рис. 9.

Измерение параметров структуры Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Ta проводилось в контактном режиме при подаче импульсов напряжения от -1 до 1 В. Напряжение записи  $U_{\text{set}}$  составило 0.8 В при токе 20 нА. Напряжение сброса  $U_{\text{res}} = -0.5$  В при токе -17 нА.

Вольт-амперная характеристика кроссбар-мемристорных структур Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Ag представлена на рис. 10.

Измерение параметров структуры Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Ag проводилось в контактном режиме при подаче импульсов напряжения от -0.5 до 0.5 В. Напряжение записи  $U_{\text{set}}$  составило 0,43 В при токе 5.1 нА. Напряжение сброса  $U_{\text{res}} = -0.3$  при токе -18 нА.

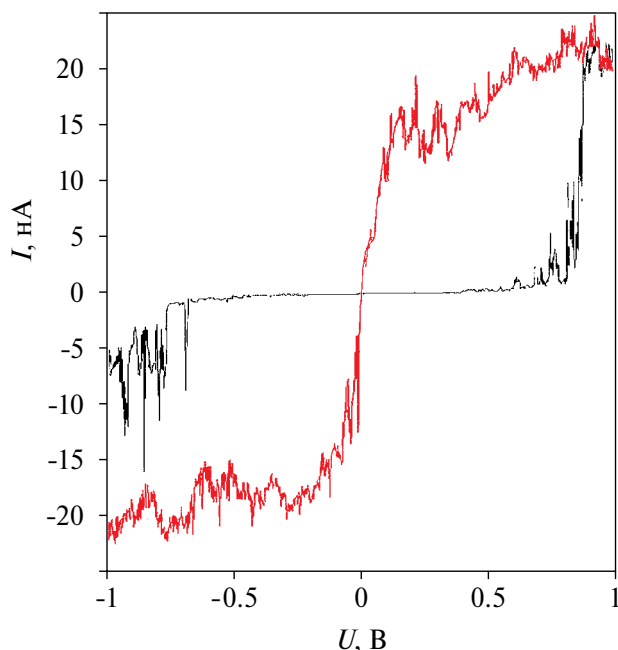


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики структуры Si/SiO<sub>2</sub>/Ti/TiO<sub>2</sub>/Ta.

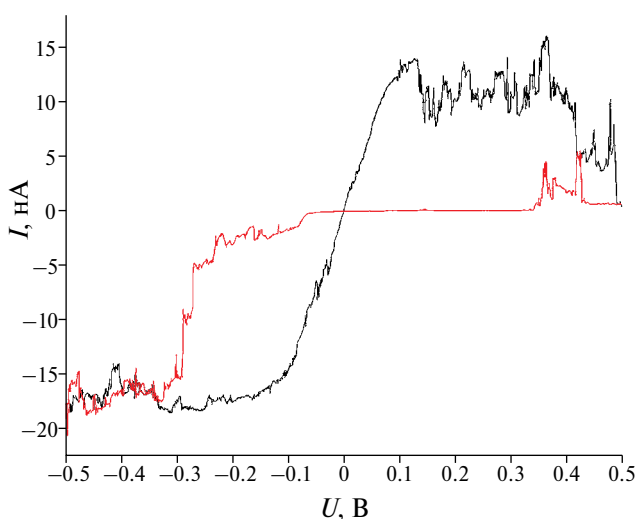


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики структуры Si/SiO<sub>2</sub>/Ti/TiO<sub>2</sub>/Ag.

Таблица 1. Расчетные значения  $R_{HRS} / R_{LRS}$

Структура	$R_{HRS}$	$R_{LRS}$	$R_{HRS} / R_{LRS}$
Si / SiO <sub>2</sub> / Ti / TiO <sub>2</sub> / Al	1.200	0.20	6.0
Si / SiO <sub>2</sub> / Ti / TiO <sub>2</sub> / Ni	0.020	0.05	0.4
Si / SiO <sub>2</sub> / Ti / TiO <sub>2</sub> / Cr	0.210	0.27	0.7
Si / SiO <sub>2</sub> / Ti / TiO <sub>2</sub> / Mo	2.700	0.18	15.0
Si / SiO <sub>2</sub> / Ti / TiO <sub>2</sub> / Ta	0.020	0.04	0.5
Si / SiO <sub>2</sub> / Ti / TiO <sub>2</sub> / Ag	0.016	0.08	0.2

Одним из показателей оптимальной работы мемристора является отношение высокоомного сопротивления ( $HRS$ ) к низкоомному ( $LRS$ ), которое рассчитано нами для каждой из сформированных и полученных структур.

Высокоомное сопротивление определено по формуле

$$R_{HRS} = U_{res} / I_{res},$$

где  $U_{res}$  — напряжение сброса;  $I_{res}$  — ток сброса.

Низкоомное сопротивление вычислено по следующей формуле:

$$R_{LRS} = U_{set} / I_{set},$$

где  $U_{set}$  — напряжение записи;  $I_{set}$  — ток записи.

Расчетные значения  $R_{HRS} / R_{LRS}$  приведены в табл. 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе исследования мемристорного эффекта в кроссбар-архитектуре структур для нейроморфных систем искусственного интеллекта с различными материалами верхнего контакта было выявлено, что все полученные структуры обладали мемристорным эффектом. Наибольшее значение отношений высокоомного сопротивления ( $HRS$ ) к низкоомному ( $LRS$ ) — 15 — показала структура Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Mo, а наименьшее значение — 0.2 — структура Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Ag. Полученные данные указывают на то, что в результате проведенных экспериментальных исследований выявлено оптимальное сочетание материалов для формирования кроссбар-мемристорных структур, которые в дальнейшем смогут быть использованы в устройствах нейроморфных систем искусственного интеллекта на основе структуры Si / SiO<sub>2</sub> / Ti / TiO<sub>2</sub> / Mo.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа выполнена в рамках проекта “Разработка и исследование методов и средств мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния инженерных объектов на основе искусственного интеллекта” (задание № FENW-2020-0022). Магнетронное распыление проводилось за счет гранта российского научного фонда № 23-29-00827, <https://rfcf.ru/project/23-29-00827/> в Южном федеральном университете.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пройдаков Э.М.* Современное состояние исследований в области искусственного интеллекта // Цифровая экономика. 2018. Т. 3. № 3. С. 50–62.
2. *Гафаров Ф.М.* Искусственные нейронные сети и приложения. Казань: Казань, 2018.
3. *Zidan M.A., Strachan J.P., Lu W.D.* The future of electronics based on memristive systems // Nat. Electron. 2018. V. 1. P. 22.
4. *Kozhukhov A.S., Scheglov D.V., Fedina L.I., Latyshev A.V.* The initial stages of atomic force microscope based local anodic oxidation of silicon AIP Advances 8, 025113 (2018).  
<https://doi.org/10.1063/1.5007914>
5. *Colangelo F., Piazza V., Coletti C., Roddaro S., Beltram F., Pingue P.* Local anodic oxidation on hydrogen-intercalated graphene layers: oxide composition analysis and role of the silicon carbide substrate. 2 May 2018.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa59c7>.
6. *Polyakova V.V., Saenko A.V.* Local Anodic Oxidation for Crossbar-Array Architecture Technical Physics. 2022. V. 92. No. 8. P. 1159–1165.
7. *Розанов Р.Ю., Кондрашов В.А., Неволин В.К., Чаплыгин Ю.А.* Разработка и исследование мемристоров на основе металлических пленок наноразмерной толщины // Наноинженерия. 2014. № 2. С. 22–28.
8. *Choi B.J., Torrezan A.C., Norris K.J., Miao F.* Electrical Performance and Scalability of Pt Dispersed SiO<sub>2</sub> Nanometallic Resistance Switch // Nano Lett. 2013. № 13 (7). P. 3213–3217.

## RESEARCH OF MEMRISTOR EFFECT IN CROSSBAR ARCHITECTURE FOR NEUROMORPHIC ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

V. V. Polyakova<sup>a</sup>, A. V. Saenko<sup>a</sup>, I. N. Kots<sup>a</sup>, A. V. Kovalev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Southern Federal University, Taganrog, Russia*

This article presents the results of experimental studies of structures formed on the basis of the crossbar architecture of memristor structures made of various materials. TiO<sub>2</sub> was used as a working memristor layer. The following materials were used for the contact pads: Al, Ni, Cr, Mo, Ta, Ag. In the course of experimental studies, the optimal combination of materials for the formation of crossbar memristor structures was revealed, which in the future can be used in devices of neuromorphic artificial intelligence systems.

*Keywords:* memristor, crossbar architecture, neuromorphic systems, magnetron sputtering, atomic force microscopy

## REFERENCES

1. *Proydaikov E.M.* Современное состояние исследований в области искусственного интеллекта // Digital economy. 2018. Т. 3. No. 3. P. 50.
2. *Gafarov F.M.* Artificial neural networks and applications. Kazan: Kazan, 2018.
3. *Zidan M.A., Strachan J.P., Lu W.D.* The future of electronics based on memristive systems // Nat. Electron. 2018. V. 1. P. 22.
4. *Kozhukhov A.S., Scheglov D.V., Fedina L.I., Latyshev A.V.* The initial stages of atomic force microscope based local anodic oxidation of silicon AIP Advances 8, 025113 (2018).  
<https://doi.org/10.1063/1.5007914>
5. *Colangelo F., Piazza V., Coletti C., Roddaro S., Beltram F., Pingue P.* Local anodic oxidation on hydrogen-intercalated graphene layers: oxide composition analysis and role of the silicon carbide substrate. 2 May 2018.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa59c7>.
6. *Polyakova V.V., Saenko A.V.* Local Anodic Oxidation for Crossbar-Array Architecture Technical Physics. 2022. V. 92. No. 8. P. 1159–1165.
7. *Rozanov R.Yu., Kondrashov V.A., Nevolin V.K., Chaplygin Yu. A.* Development and research of memristors based on metal films of nanoscale thickness // Nanoengineering. 2014. No. 2. P. 22–28.
8. *Choi B.J., Torrezan A.C., Norris K.J., Miao F.* Electrical Performance and Scalability of Pt Dispersed SiO<sub>2</sub> Nanometallic Resistance Switch // Nano Lett. 2013. № 13 (7). P. 3213–3217.