# Исследование резистивного переключения в мемристорной структуре на основе пленки оксида титана с графеновым интерфейсом

© Д.Х. Родригес, И.Л. Житяев, М.С. Картель, Р.В. Томинов, Э. Кошуджу, В.А. Смирнов

Лаборатория нейроэлектроники и мемристивных наноматериалов (НЕЙРОМЕНА),
Южный федеральный университет,
347922 Таганрог, Россия

E-mail: srodriges@sfedu.ru

Поступила в Редакцию 31 марта 2026 г.
В окончательной редакции 23 апреля 2026 г.
Принята к публикации 3 июля 2026 г.

Представлены результаты исследования мемристорных свойств оксида титана на поверхности графена. Толщина слоя титана составила 10 нм. В качестве верхнего электрода использованы контактные площадки из оксида индия–олова. Исследованы конфигурации мемристорной структуры вертикального типа ITO/$TiO_2$/графен и планарная — с двумя верхними контактами из оксида индия–олова. Обе конфигурации демонстрируют устойчивое биполярное резистивное переключение. Для вертикальной структуры отношение сопротивлений $R_{off}/R_{on}$ составило $\sim 2.35 \pm 0.25$. В планарной конфигурации графен обеспечивает латеральный транспорт носителей при переходе оксида титана в низкоомное состояние. Для данной конфигурации продемонстрирована стабильная работа на протяжении более $10^3$ циклов переключения с сопротивлениями в высокоомном и низкоомном состояниях $260 \pm 10$ и $115 \pm 13$ Ом соответственно, отношение сопротивлений $R_{off}/R_{on}$ составляет $\sim 2.2 \pm 0.3$. Результаты подтверждают перспективность графеновых электродов для новых схемотехнических решений в мемристорах на основе оксида титана.

**Ключевые слова:** мемристор, графен, диоксид титана, резистивное переключение, проводящий канал.

DOI: 10.61011/FTP.2026.03.63584.9404

## 1. Введение

Традиционная архитектура фон Неймана, характеризующаяся физическим разделением блоков памяти и обработки данных, сталкивается с фундаментальными ограничениями пропускной способности и энергоэффективности из-за интенсивного обмена данными между этими блоками [1]. В качестве одного из наиболее перспективных путей преодоления данного ограничения рассматриваются мемристоры — резистивные элементы с памятью, способные совмещать функции хранения и обработки информации в одной ячейке, что открывает путь к созданию нейроморфных вычислительных систем, архитектурно подобных биологическому мозгу [2]. Простота структуры „металл–диэлектрик–металл", высокое быстродействие, измеряемое наносекундами, и потенциальная масштабируемость до нанометровых размеров делают мемристоры ключевыми элементами для энергонезависимой памяти, реконфигурируемой логики и аппаратной реализации искусственных нейронных сетей [3,4].

Наибольшее распространение в современной микроэлектронике получили мемристоры на основе оксидов металлов, таких как $TiO_2$, $HfO_2$, $TaO_x$, ZnO, в которых резистивное переключение обеспечивается обратимым формированием и разрушением проводящих каналов, состоящих из кислородных вакансий или ионов металла [5–7]. Данные материалы привлекают внимание исследователей благодаря совместимости с технологическими процессами КМОП (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник) и относительно простой интеграции в существующую элементную базу [8]. Однако, несмотря на многообещающие результаты лабораторных исследований, именно филаментарный механизм переключения является источником ключевых недостатков таких структур. Процесс образования проводящего канала носит стохастический характер, что приводит к высокой вариативности напряжений переключения и сопротивлений в открытом и закрытом состояниях от цикла к циклу, что делает их промышленное применение затруднительным в прецизионных аналоговых вычислениях [9,10].

Температура в области проводящего канала из-за локального джоулева нагрева может составлять несколько сотен градусов Цельсия, что является основной причиной термически индуцированной диффузии материала электродов и необратимой деградации тонкого оксидного слоя, приводящей к отказу устройства [11–13]. Таким образом, высокая температура эксплуатации, неконтролируемое энергопотребление и низкая надежность остаются главными барьерами на пути к коммерциализации оксидных мемристоров, несмотря на их очевидные функциональные преимущества перед традиционной флэш-памятью [14,15].

В связи с этим в последние годы огромный интерес научного сообщества вызывает использование двумерных материалов, в частности графена, для создания мемри-

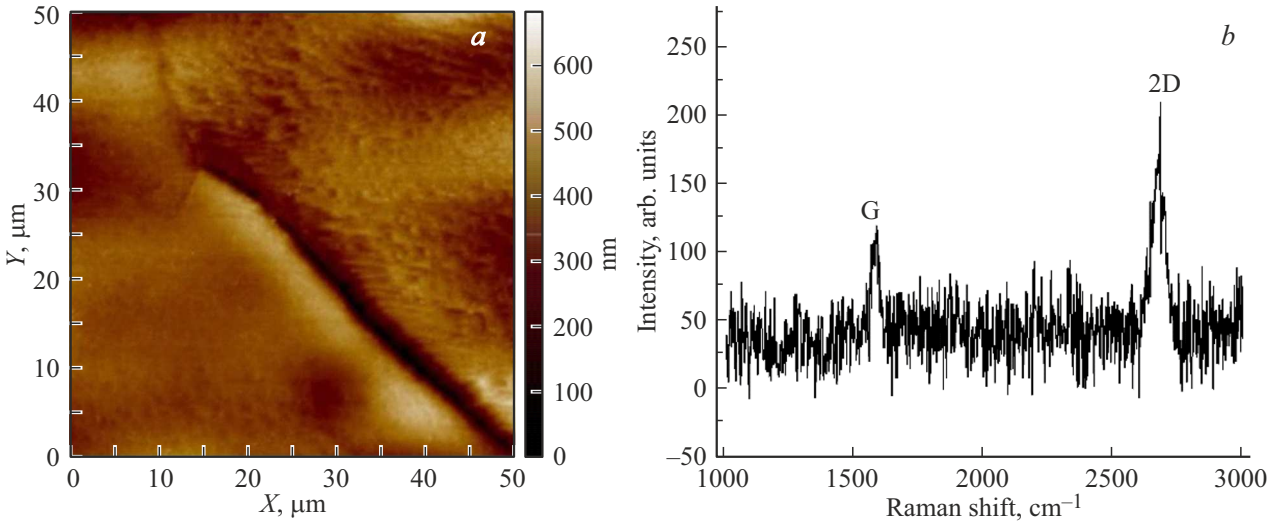



**Рис. 1.** Графен, синтезированный на медной фольге методом химического осаждения из газовой фазы: АСМ-изображение $50 \times 50$ мкм ($a$) и КРС-спектр ($b$).

сторных структур, способных нивелировать недостатки традиционных оксидных материалов [16,17]. Графен — это моноатомный слой углерода с $sp^2$-гибридизацией, впервые полученный и исследованный группой А. Гейма и К. Новоселова, обладает уникальным набором физических свойств: высокой подвижностью носителей заряда, теплопроводностью и механической прочностью [18,19]. Интеграция графена в мемристорную структуру позволяет изменить физику процессов переключения, решая фундаментальные проблемы оксидных материалов за счет управления тепловыми потоками и стабилизации ионной динамики на интерфейсах [20].

Физическое обоснование использования графена в качестве буферного слоя базируется на его способности выступать в роли эффективного теплового стока, отводящего избыточное джоулево тепло из активной области переключения. Локализованный разогрев является основной причиной деградации оксидных мемристоров, однако наличие графенового интерфейса с высокой теплопроводностью способствует быстрому рассеиванию тепла, снижая локальную температуру в оксиде и подавляя термически активируемую диффузию дефектов [21–23]. Кроме того, благодаря своей атомарной гладкости и высокой плотности графен выступает в роли эффективного диффузионного барьера, ограничивающего неконтролируемую миграцию ионов металла и кислородных вакансий между электродом и диэлектриком, что напрямую повышает стабильность работы и продлевает срок службы устройства. Введение графенового интерфейса позволяет локализовать и контролировать процесс формирования проводящего канала, что выражается в значительном снижении вариации напряжений переключения и увеличении количества различных проводящих состояний, критически важных для создания аналоговых нейроморфных систем [24–27].

Цель данной работы — экспериментальное исследование влияния графенового буферного слоя на характеристики мемристорной структуры ITO/$TiO_2$/графен (англ. Indium tin oxide — ITO). Особое внимание уделено сравнению двух конфигураций включения: вертикальной (между верхним ITO- и нижним графеновым контактом) и планарной (между двумя верхними ITO-контактами). Во втором случае графеновый слой играет ключевую роль, обеспечивая проводящий канал благодаря своей высокой электропроводности при активации проводящего канала в $TiO_2$, что открывает новые перспективы для проектирования мемристорных устройств.

## 2. Методика эксперимента

В данной работе в качестве подложек для формирования мемристорных структур использовались пленки графена, синтезированные на медной фольге методом химического осаждения из газовой фазы (CVD). Контроль структурных и морфологических характеристик графеновых пленок осуществлялся с использованием комплекса методов диагностики. Исследование поверхности проводилось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 Pro (NT-MDT, Россия) в полуконтактном режиме с использованием кремниевых кантилеверов (рис. 1, $a$).

Для оценки качества графена, определения количества слоев и выявления структурных дефектов применялась спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) на микроскопе-спектрометре EnSpectr R532 (Спектр-М, Россия) с возбуждением излучением лазера с длиной волны 532 нм и мощностью $\leq 1$ мВт во избежание термического повреждения образцов (рис. 1, $b$). Регистрация спектров осуществлялась с использованием

двадцатикратного объектива для оптического контроля области измерения. Спектр характеризуется повышенным уровнем фонового шума. Это характерно для графена на металлической подложке (меди), так как металл может давать люминесцентный фон или усиливать рассеяние. Анализ спектров, включая соотношение интенсивностей пиков G и 2D, которое составило $I_{2D}/I_G \sim 1.8$, а также низкая интенсивность D-пика, позволил идентифицировать участки преимущественно с 1–2 NT-MDT атомными слоями и высоким структурным совершенством синтезированных пленок.

На следующем этапе на подготовленную поверхность графеновых пленок наносилась пленка диоксида титана толщиной 10 нм методом магнетронного распыления на установке VSE-PVD-DESK-PRO (ООО „АкадемВак“, Россия). Процесс напыления осуществлялся при комнатной температуре в атмосфере высокочистого аргона (давление 0.5 Па) на постоянном токе при мощности разряда 100 Вт. Выбор режимов осаждения обеспечивал формирование аморфной структуры $TiO_2$, оптимальной для проявления резистивного переключения.

Формирование верхних электродов осуществлялось методом магнетронного распыления оксида индия–олова через теневую маску. Толщина осаждаемых ITO-пленок составляла 100 нм, диаметр контактов — 350 мкм, расстояние между контактами $\sim 170$ мкм. Для исследования влияния конфигурации электродов на характеристики переключения контактные площадки формировались непосредственно на поверхности $TiO_2$. Нижним общим электродом в обоих случаях служила графеновая пленка на меди. Таким образом, была сформирована мемристорная структура ITO/$TiO_2$/графен (рис. 2, *a*, и 3, *a*).

Измерение электрических характеристик полученных мемристорных структур проводилось при комнатной температуре в атмосферных условиях с использованием зондовой станции MS-4 (KHP) с вольфрамовыми зондами, диаметр острия которых составлял $\sim 100$ нм. Исследование вольт-амперных характеристик осуществлялось в режиме циклической развертки напряжения в диапазоне от $-3$ до $+3$ В (шаг 0.1 В) при комнатной температуре для выявления биполярного резистивного переключения. Для вертикальной конфигурации напряжение подавалось между верхним электродом ITO и нижним электродом графен. Для планарной конфигурации напряжение подавалось между двумя верхними электродами ITO. Для оценки стабильности параметров планарной конфигурации были проведены циклические испытания в течение $10^3$ циклов с регистрацией сопротивлений в высокоомном $R_{off}$ и низкоомном $R_{on}$ состояниях.

## 3. Результаты

На рис. 2, *b* представлены результаты циклических электрических измерений мемристорной структуры для вертикальной конфигурации. Показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) для 10 последовательных измерений (светлые линии), а также усредненная ВАХ (контрастные линии). Как видно из представленных вольт-амперных характеристик, структура демонстрирует стабильное биполярное резистивное переключение с характерной петлей гистерезиса.

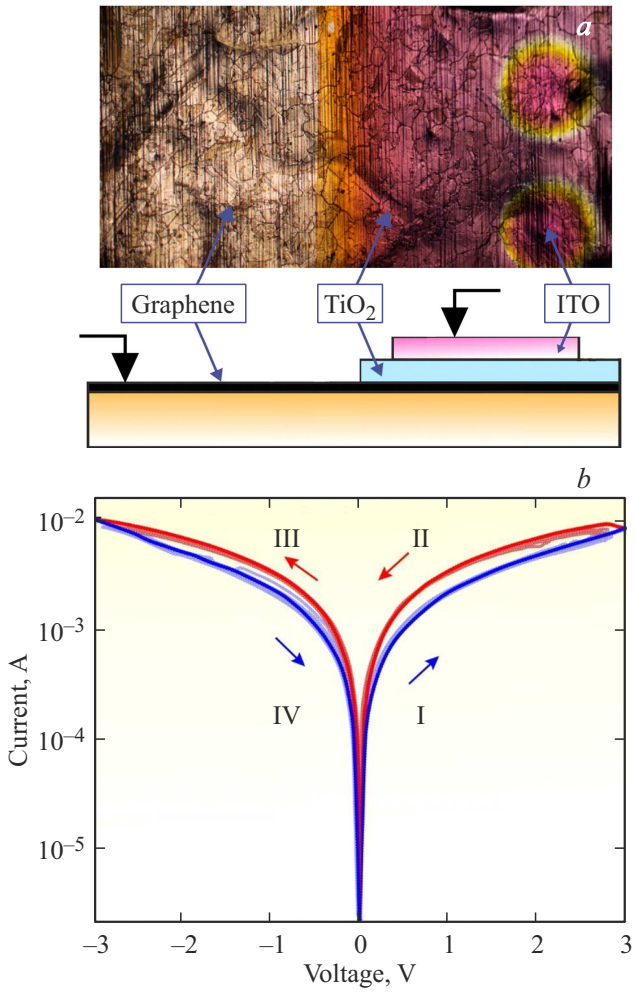



**Рис. 2.** Мемристорная структура ITO/$TiO_2$/графен вертикальной конфигурации: схематическое изображение (*a*) и экспериментальная ВАХ (*b*).

При подаче положительного напряжения смещения наблюдается увеличение тока (процесс Set), что соответствует переключению структуры в низкоомное состояние (LRS). В этот момент в структуре формируется проводящий канал. При обратном ходе напряжения структура сохраняет LRS до достижения напряжения сброса (процесс Reset), что приводит к частичному разрушению проводящего канала, при котором происходит возврат в высокоомное состояние (HRS). Отношение сопротивлений $R_{off}/R_{on}$ составило $2.35 \pm 0.25$. Полученное значение характерно для филаментарного механизма переключения в оксидных материалах.

На следующем этапе были исследованы мемристорные структуры в планарной конфигурации с двумя

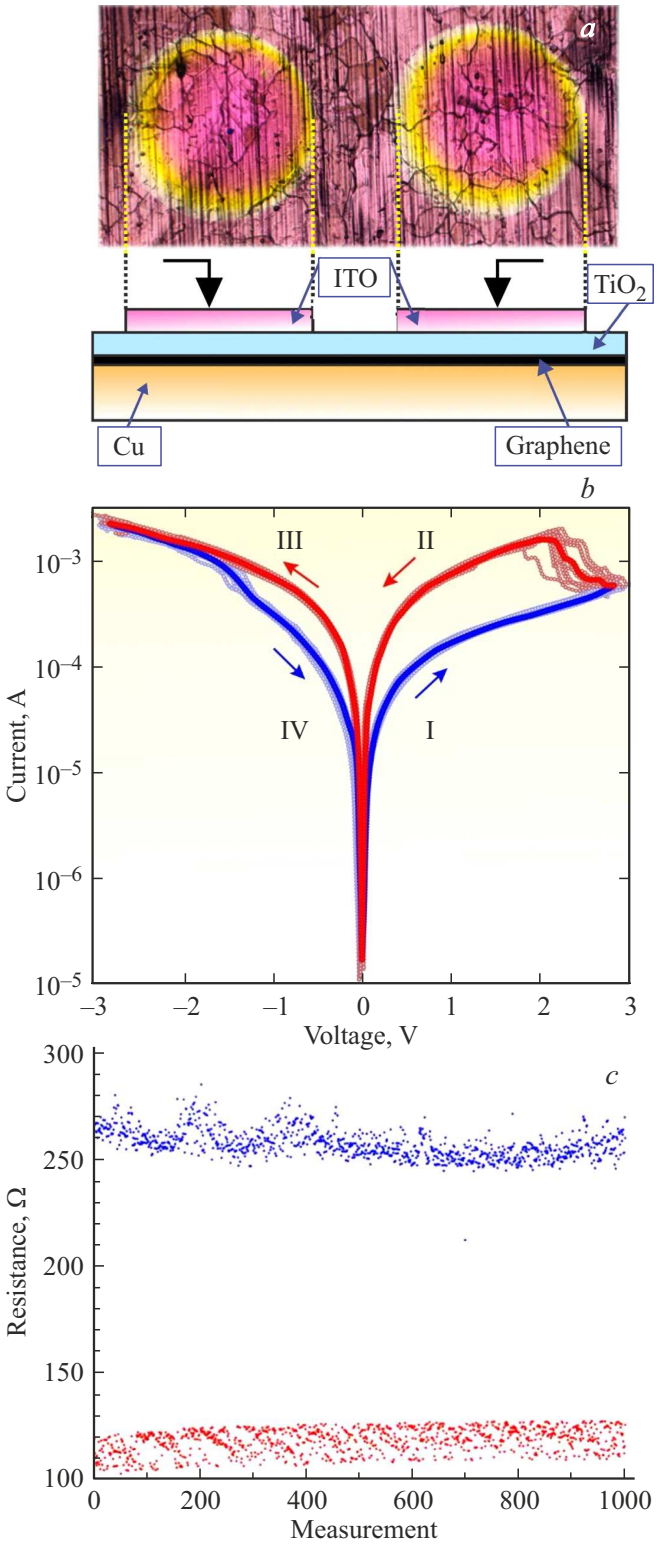



**Рис. 3.** Мемристорная структура ITO/$TiO_2$/графен планарной конфигурации: схематическое изображение ($a$), экспериментальная ВАХ ($b$), и зависимость циклической стабильности сопротивлений в состояниях HRS и LRS в течение $10^3$ циклов переключения ($c$).

верхними ITO-электродами. Серия циклических измерений ВАХ (светлые линии) и их усредненное значение (контрастные линии) также демонстрируют биполярное резистивное переключение (рис. 3, $b$).

Разница между токами в состояниях LRS и HRS при напряжении считывания 1 В составляет примерно один порядок (от $10^{-3}$ до $10^{-4}$ А). Небольшой разброс значений между измеренными ВАХ подтверждает, что графен успешно выполняет роль стабилизатора проводящего канала, обеспечивая высокую воспроизводимость параметров.

Для оценки стабильности и воспроизводимости переключения дополнительно были проведены испытания в течение $10^3$ циклов измерений. Как показано на рис. 3, $c$, структура демонстрирует высокую стабильность параметров без признаков деградации на протяжении всех циклов, что свидетельствует о высокой степени контроля над процессом формирования/разрушения проводящего канала.

Анализ сопротивлений подтверждает разделение состояний $R_{off}$ и $R_{on}$. На зависимости сопротивления от количества циклов измерений наблюдаются два состояния: HRS с сопротивлением $\sim 260 \pm 10$ Ом и LRS с сопротивлением $\sim 115 \pm 13$ Ом. Отношение сопротивлений $R_{off}/R_{on}$ составило $2.25 \pm 0.3$.

## 4. Обсуждение результатов

Экспериментально показано, что обе исследованные конфигурации на основе структуры ITO/$TiO_2$/графен проявляют мемристорные свойства. Наблюдаемое биполярное переключение может быть объяснено миграцией кислородных вакансий под действием приложенного электрического поля, что приводит к образованию и разрушению проводящего канала.

Определяющую роль в работе обеих конфигураций играет графеновый подслой, интегрированный между медной подложкой и слоем $TiO_2$. Атомарно-гладкая поверхность и высокая плотность графена ограничивают нежелательную диффузию атомов меди из нижнего электрода в $TiO_2$, а также стабилизируют процессы нуклеации и роста проводящего канала. Вместо хаотичного роста в объеме оксида, проводящий канал формируется более упорядоченно на интерфейсе с графеном, что напрямую снижает вариативность параметров переключения.

Состояние планарного мемристора определяется проводимостью между двумя верхними контактами. При переключении структуры в низкоомное состояние сформировавшиеся в $TiO_2$ проводящие каналы замыкают верхние ITO-электроды на графеновый слой. Высокая электропроводность графена является ключевым свойством для планарной конфигурации. Графен выступает не только в роли нижнего электрода, но и как активный элемент, обеспечивающий латеральный транспорт носителей между двумя верхними электродами. Это может быть использовано для создания более сложных

логических и нейроморфных схем, где графен выполняет роль внутренней шины данных. Без проводящего графенового подслоя напряженности электрического поля при разности потенциалов 3 В было бы недостаточно для формирования латерального канала непосредственно в слое оксида между верхними электродами, расположенными на расстоянии $\sim 170$ мкм.

Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с современными тенденциями в области интерфейсной инженерии мемристоров и демонстрируют преимущество использования графена по сравнению с чисто металлическими электродами. Металлические электроды не обладают столь же эффективными проводящими, теплоотводящими и барьерными свойствами на атомарном уровне, что особенно важно для планарной конфигурации.

## 5. Заключение

В ходе данной работы была экспериментально исследована мемристорная структура на основе $TiO_2$ с графеновым подслоем, синтезированным методом CVD. Показано, что структура демонстрирует стабильное биполярное резистивное переключение как в вертикальной, так и в планарной конфигурациях электродов. Для вертикальной конфигурации отношение сопротивлений $R_{off}/R_{on}$ составило $\sim 2.35$, а для планарной конфигурации это отношение достигло значения $\sim 2.25$. Установлено, что планарная конфигурация с двумя верхними ITO-контактами демонстрирует высокую воспроизводимость параметров переключения в течение не менее $10^3$ циклов, что подтверждается незначительным разбросом сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях.

Продемонстрирована важная роль графенового подслоя: его высокая электропроводность обеспечивает функционирование планарной конфигурации, создавая латеральный транспортный канал между верхними электродами при переключении $TiO_2$ в проводящее состояние. Барьерные свойства графена стабилизируют процесс формирования проводящего канала. Благодаря высокой теплопроводности графена решается задача эффективного отвода джоулева тепла из активной области проводящего канала. Это критически важно для подавления термически индуцированной диффузии и неконтролируемого роста проводящего канала, что также способствует стабилизации параметров $R_{off}/R_{on}$, $U_{set}$ и $U_{reset}$.

Полученные результаты подтверждают, что использование графена является перспективным подходом не только для повышения надежности вертикальных мемристорных ячеек на основе диоксида титана, но и для создания планарных конфигураций с общим графеновым электродом.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-19-00809, https://rscf.ru/project/25-19-00809/ в Южном федеральном университете (в части изготовления экспериментальных образцов мемристорных структур на основе графена), а также в рамках Программы стратегического академического лидерства ЮФУ „Приоритет-2030“, проект № СП02/Ю8_0708Приоритет_01 (в части параметрического анализа мемристорных структур).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

[1] J. Pronold, J. Jordan, B.J. Wylie, I. Kitayama, M. Diesmann, S. Kunkel. Parallel Comput., **113**, 102952 (2022). DOI: 10.1016/j.parco.2022.102952
[2] S. Kumar, R.S. Williams, Z. Wang. Nature, **585** (7826), 518 (2020). DOI: 10.1038/s41586-020-2735-5
[3] Z. Cao, B. Sun, G. Zhou, S. Mao, S. Zhu, J. Zhang, C. Ke, Y. Zhao, J. Shao. Nanoscale Horiz., **8** (6), 716 (2023). DOI: 10.1039/D2NH00536K
[4] B. Jana, A. Roy Chaudhuri. Chips, **3** (3), 235 (2024). DOI: 10.3390/chips3030012
[5] R. Waser, R. Dittmann, G. Staikov, K. Szot. Adv. Mater., **21** (25–26), 2632 (2009). DOI: 10.1002/adma.200900375
[6] A.V. Saenko, R.V. Tominov, I.L. Jityaev, Z.E. Vakulov, V.I. Avilov, N.V. Polupanov, V.A. Smirnov. Nanomaterials, **14** (23), 1901 (2024). DOI: 10.3390/nano14231901
[7] V.I. Avilov, R.V. Tominov, Z.E. Vakulov, D.J. Rodriguez, N.V. Polupanov, V.A. Smirnov. Nanomaterials, **15** (1), 75 (2025). DOI: 10.3390/nano15010075
[8] X. Sheng, C.E. Graves, S. Kumar, X. Li, B. Buchanan, L. Zheng, S. Lam, C. Li, S. Williams, J.P. Strachan. Adv. Electron. Mater., **5** (9), 1800876 (2019). DOI: 10.1002/aelm.201800876
[9] I. Jityaev, V. Avilov, A. Avakyan, A. Fedotov, C. Prakash, V. Smirnov. In: 2023 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA) p. 108 (IEEE, 2023). DOI: 10.1109/DCNA59899.2023.10290497
[10] J.B. Roldán, E. Miranda, D. Maldonado, A.N. Mikhaylov, N.V. Agudov, A.A. Dubkov, M.N. Koryazhkina, M.B. Gongora, L.O. Chua. Adv. Intell. Syst., **5** (6), 2200338 (2023). DOI: 10.1002/aisy.202200338
[11] S.K. Nandi, E. Puyoo, S.K. Nath, D. Albertini, N. Baboux, S.K. Das, T. Blon, R.G. Elliman. ACS Appl. Mater. Interfaces, **14** (25), 29025 (2022). DOI: 10.1021/acsami.2c06870
[12] K.S. Woo, R.S. Williams, S. Kumar. Chem. Rev., **125** (1), 294 (2025). DOI: 10.1021/acs.chemrev.4c00454
[13] Y. Cai, W. Yu, Q. Zhu, X. Liu, X. Guo, W. Liang. Nanoscale, **17** (30), 17758 (2025). DOI: 10.1039/D5NR01019E
[14] K. Sato, Y. Hayashi, N. Masaoka, T. Tohei, A. Sakai. Sci. Rep., **13** (1), 1261 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-28075-4
[15] W. Chen, L. Song, S. Wang, Z. Zhang, G. Wang, G. Hu, S. Gao. Adv. Electron. Mater., **9** (2), 2200833 (2023). DOI: 10.1002/aelm.202200833

[16] M.S. Kim, S. Kim. ACS Appl. Electron. Mater., **6** (6), 3998 (2024). DOI: 10.1021/acsaelm.4c00428
[17] S. Hadke, M.A. Kang, V.K. Sangwan, M.C. Hersam. Chem. Rev., **125** (2), 835 (2025). DOI: 10.1021/acs.chemrev.4c00631
[18] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov. Science, **306** (5696), 666 (2004). DOI: 10.1126/science.1102896
[19] A.S. Kolomiytsev, I.L. Jityaev, A.M. Svetlichnyi, A.A. Fedotov, O.A. Ageev. Diamond Relat. Mater., **108**, 107969 (2020). DOI: 10.1016/j.diamond.2020.107969
[20] T. Mei, F. Chen, T. Huang, Z. Feng, T. Wan, Z. Han, J. Li, D. Chu. ACS Nano, **19** (18), 17140 (2025). DOI: 10.1021/acsnano.5c02397
[21] S. Zhang, Y. Tao, S. Qin, D. Li, K. Cao, L. Lv, Y. Peng, W. Hao. npj 2D Mater. Appl., **8** (1), 81 (2024). DOI: 10.1038/s41699-024-00519-z
[22] F. Pan, S. Gao, C. Chen, C. Song, F. Zeng. Mater. Sci. Eng. R, **83**, 1 (2014). DOI: 10.1016/j.mser.2014.06.002
[23] S. Ji, J. Kim, J. Hong, J. Choi, S. Yun, A.K. Katiyar, M.K. Song, J.H. Ahn. Small, e07845 (2025). DOI: 10.1002/smll.202507845
[24] R. Mehta, S. Chugh, Z. Chen. Nanoscale, **9** (5), 1827 (2017). DOI: 10.1039/C6NR07637H
[25] I.L. Jityaev, M.S. Kartel, Yu.Yu. Jityaeva, V.A. Smirnov. Russ. Microelectron., **54** (8), 859 (2025). DOI: 10.1134/S1063739725601869
[26] C. Mihai, I.D. Simandan, F. Sava, T. Tite, A. Bocirnea, M. Vaduva, A.C. Galca, A. Velea. Nanomaterials, **15** (16), 1239 (2025). DOI: 10.3390/nano15161239
[27] T.T.H. Vu, M.H. Park, T.L. Phan, H.J. Park, V.T. Vu, H.J. Kim, S.G. Yoon, W.J. Yu. Appl. Surf. Sci., **689**, 162460 (2025). DOI: 10.1016/j.apsusc.2025.162460

*Редактор Г.А. Оганесян*

## Resistive switching investigation in a memristive structure based on titanium oxide film with a graphene interface

*D.J. Rodriguez, I.L. Jityaeva, M.S. Kartel, R.V. Tominov, E. Kosucu, V.A. Smirnov*

Research Laboratory Neuroelectronics
and Memristive Nanomaterials (NEUROMENA),
Southern Federal University,
347922 Taganrog, Russia

**Abstract** The results of a study of the memristor properties of titanium oxide on the surface of graphene are presented. The titanium oxide layer thickness was 10 nm. Indium tin oxide contact pads were employed as the top electrode. Two memristor configurations were investigated: a vertical-type structure ITO/$TiO_2$/graphene and a planar structure with two top indium tin oxide contacts. Both configurations exhibit stable bipolar resistive switching. For the vertical structure, the resistance ratio $R_{off}/R_{on}$ was approximately $2.35 \pm 0.25$. In the planar configuration, graphene facilitates lateral charge carrier transport when the titanium oxide layer transitions to the low-resistance state. For this configuration, stable operation was demonstrated over more than $10^3$ switching cycles, with resistances in the high-resistance and low-resistance states of $260 \pm 10$ and $115 \pm 13\,\Omega$, respectively, corresponding to an $R_{off}/R_{on}$ ratio of $\sim 2.25 \pm 0.3$. The obtained results confirm the viability of graphene electrodes for novel circuit design solutions in titanium oxide-based memristors.