

УДК 538.975
EDN: HRZHYZ

PACS: 73.63.-b

Фотомемристивные переключения в кристаллах селенида висмута*А. В. Зотов, Г. Н. Панин, Н. А. Тулина, Д. Н. Борисенко, Н. Н. Колесников*

Обнаружен эффект оптических переключений резистивных состояний в структурах на основе халькогенидных соединений Bi_2Se_3 с медным и графеновым электродами. Предложена физическая модель, описывающая протекающие при переключениях процессы. Полученные результаты указывают на возможность применения исследованных фотомемристивных структур для нейроморфных вычислений в качестве искусственных синапсов, весовые коэффициенты которых можно устанавливать как электрически, так и оптически.

Ключевые слова: халькогениды; фотомемристоры; резистивные переключения; фотомемристивные состояния.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-55-59

Введение

Высокая энергоэффективность биологических «вычислительных и детектирующих систем» по сравнению с огромными энергозатратами современных вычислительных и детектирующих устройств, разработанных человеком для детектирования и анализа больших данных, связанных с визуальной информацией, стимулирует огромный интерес к исследованиям принципов работы нейроморфных си-

стем. На сегодняшний день детектирование и обработку визуальной информации проводят с использованием архитектуры Фон Неймана, при которой сенсорные блоки, блоки памяти и вычислительные блоки разделены. Это требует преобразования оптического сигнала в электрический, передачу его в вычислитель, в память и обратно. Алгоритмы машинного обучения на таких системах реализуются на уровне программного обеспечения, что, несомненно, ухудшает качество решения задачи и увеличивает энергозатраты и время обработки визуальных данных. Разработка и внедрение «аналоговых» искусственных синапсов и нейронов представляет собой чрезвычайно важную задачу для улучшения энергоэффективности и скорости обработки электрических [1–3] и оптических сигналов [4–6].

**Мемристоры на халькогенидах,
управление резистивными состояниями
электрическим полем**

Слоистые халькогенидные материалы, такие как селенид висмута Bi_2Se_3 , состоят из двух слоёв Bi и трёх слоёв Se (так называемые квинтипуплы, толщина которых около 1 нм). Эти слои связываются между собой Ван-дер-Ваальсовой связью. Благодаря этому объем-

Зотов Александр Владимирович¹, м.н.с.

E-mail: taba@iptm.ru

Панин Геннадий Николаевич¹, в.н.с., к.ф.-м.н.**Тулина Наталья Алексеевна**², с.н.с., к.ф.-м.н.**Борисенко Дмитрий Николаевич**², с.н.с., к.ф.-м.н.**Колесников Николай Николаевич**², д.т.н.

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук. Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Осипьяна, 6.

² Институт физики твёрдого тела им. Академика Осипьяна Российской академии наук. Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2.

Статья поступила в редакцию 2.08.2024

После доработки 20.11.2024

Принята к публикации 1.02.2025

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Зотов А. В., Панин Г. Н., Тулина Н. А., Борисенко Д. Н., Колесников Н. Н., 2025

ные кристаллы могут быть расщеплены вдоль этих слоёв, что позволяет получить микроскопические структуры очень высокого качества относительно простыми методами. Ранее была продемонстрирована возможность мемристивных переключений в кристаллах селенида висмута ($E_g = 0,3\text{--}0,8\text{ eV}$) [7, 8].

Из кристаллов Bi_2Se_3 , полученных методом Бриджмена, были приготовлены сколы вдоль слоёв квинтипул, с характерными размерами 3–4 мм вдоль слоёв и 200–300 мкм поперёк, которые далее переносились на подложку из меди, служившую нижним электродом. Перенесенные кристаллы прижимались к подложке механически стержнем из бериллиевой бронзы, которая служила верхним электродом. Также были изготовлены образцы из слоевых кристаллов Bi_2Se_3 , полученных эксфолиацией объемного кристалла клейкой лентой и перенесенных на подложку Si/SiO_2 с

последующим изготовлением к ним золотых электродов методом электронно-лучевой литографии (рис. 1, слева). У полученных структур были исследованы вольтамперные характеристики (ВАХ) и временные параметры электрических и оптических переключений, используя источник измеритель Keithley 2450, генератор сигналов произвольной формы GW Instek AFG 73021, осциллограф LeCroy WaveSurfer 24Xs-A и лазерное возбуждение на длине волны 650 нм.

Структура, изготовленная с золотыми электродами $\text{Au}-\text{Bi}_2\text{Se}_3-\text{Au}$, демонстрировала линейную ВАХ без особенностей резистивного переключения (рис. 1, справа). Отсутствие резистивных переключений и омическая ВАХ наблюдались также в структуре с серебряными электродами, изготовленными к краям кристалла серебряным клеем RS PRO Silver Conductive.

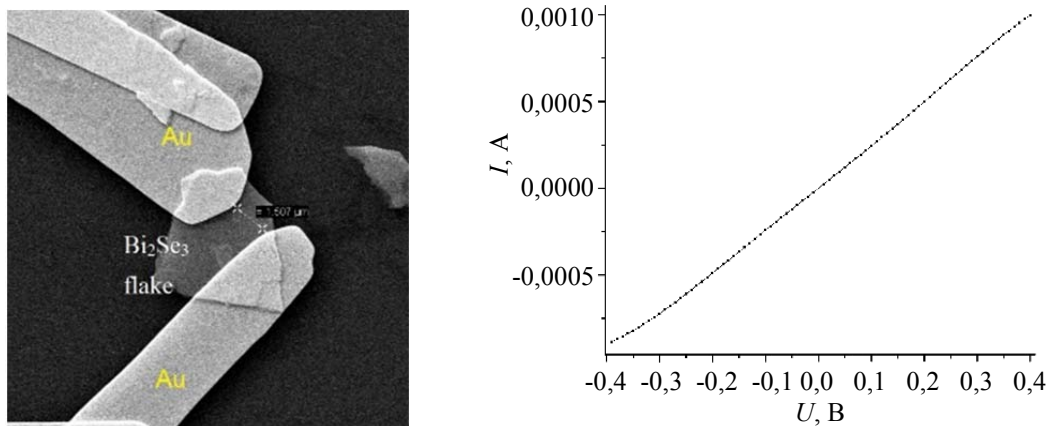


Рис. 1. Слоевые кристаллы Bi_2Se_3 , перенесенные на подложку Si/SiO_2 (эксфолиацией объемного кристалла клейкой лентой), с золотыми электродами, изготовленными методом электронной литографии (слева) и ВАХ $\text{Au}/\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Au}$ структуры (справа)

Вертикальная структура с медными электродами $\text{Cu}-\text{Bi}_2\text{Se}_3-\text{Cu}$ показала изменение сопротивления в некотором диапазоне значений от $R_{\text{high}} = 100\text{ Ом}$ до $R_{\text{low}} = 5\text{ Ом}$. Воспроизводимость величины сопротивления составляла около 10 %, что позволяло получить 9 мемристивных состояний (рис. 2), в которые переходил образец при подаче на него электрических импульсов. Таким образом было показано, что для получения в вертикальной структуре мемристивных состояний необходим «активный» электрод из меди. На основе этих экспериментальных данных, рентгеноструктурного анализа и анализа ранее

опубликованных данных был сделан вывод, что наблюдаемые резистивные переключения обусловлены миграцией соединений активного металла, перколяцией этих соединений в Ван-дер-Ваальсовы промежутки [9] и транспортом точечных структурных дефектов (таких как вакансии селена) в поверхностном модифицированном слое [10]. При приложении электрического поля одной полярности происходит зарождение проводящего канала, который сохраняется при отключении внешнего электрического поля, и его разрушение при приложении электрического поля обратной полярности.

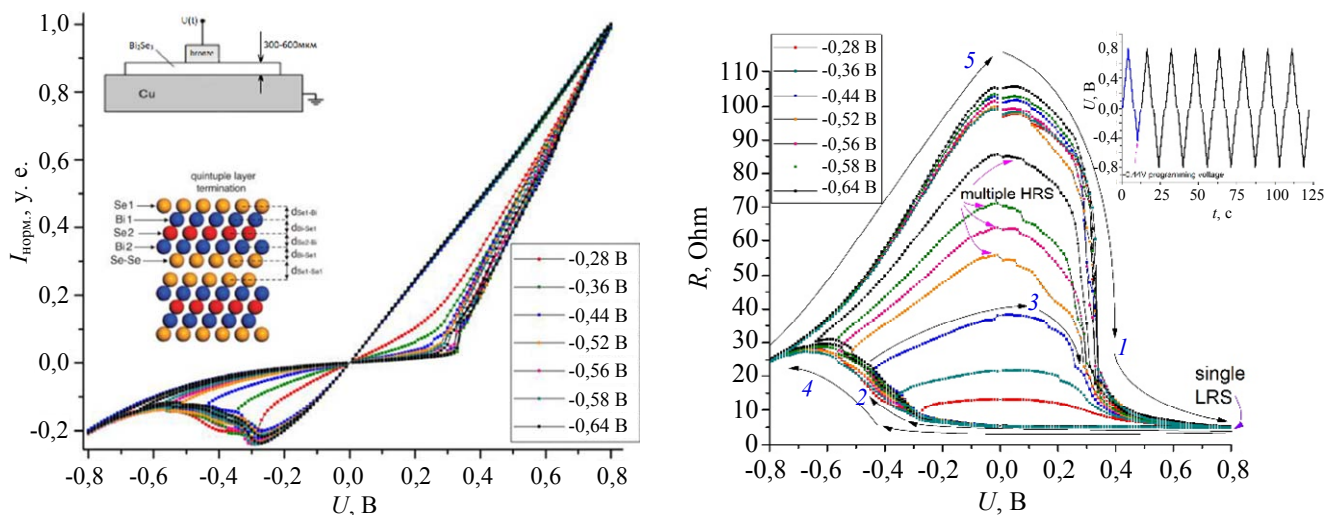


Рис. 2. Управление резистивными состояниями структуры $Cu-Bi_2Se_3-BeCu$ электрическим полем. ВАХ структуры (слева). Вставки: Схематичное изображение образца (слева сверху) и структуры Bi_2Se_3 (слева внизу). Зависимость сопротивления структуры $Cu-Bi_2Se_3-BeCu$ от напряжения смещения (справа). Вставка: Временная развертка напряжения смещения

Оптический отклик

Был исследован также оптический отклик структуры $Cu-Bi_2Se_3-BeCu$ (рис. 3). Под действием оптического излучения (лазер 650 нм) образец переходил в низкоомное состояние, при разных напряжениях смещения. При вы-

ключении оптического импульса структура «электрически» возвращалась к значению сопротивления, обусловленному электрическим полем. Переходы в промежуточные состояния оптически, как мы предполагаем, возможны при вариации параметров излучения (длины волны, длительности импульса).

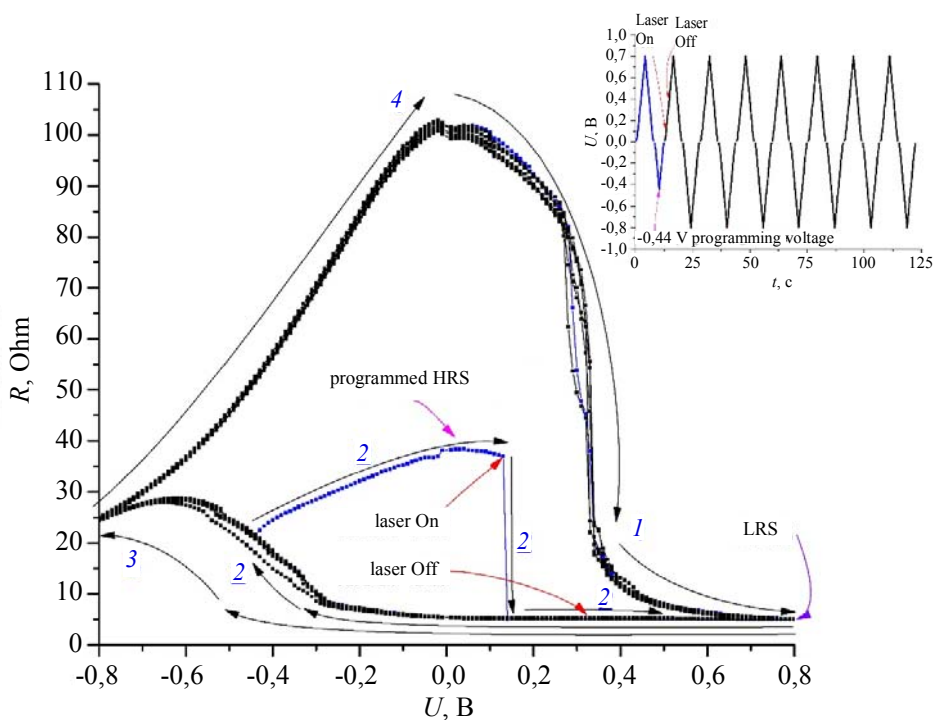


Рис. 3. Управление резистивными состояниями структуры $Cu-Bi_2Se_3-BeCu$ электрически и оптически. Вставка: временная развертка напряжения смещения структуры с программированием и оптическим возбуждением лазером 650 нм

Активный электрод из окисленного графена

Исследованные вертикальные Bi_2Se_3 структуры демонстрировали фотомемристивные свойства при наличии активного электрода, когда ток протекает поперёк слоёв квинтипул и модифицированного слоя, образующегося на поверхности Bi_2Se_3 . Для оптических применений [11] особый интерес представляют вертикальные структуры с прозрачным активным электродом. В данной работе в качестве такого электрода был применен окисленный графен (OG), который может служить источником кислорода, модифицирующим поверхностный слой структуры под действием электрического поля или оптического излучения [6].

На рисунке 4 показана зависимость сопротивления изготовленной структуры $\text{Au}/\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{OG}$ от напряжения смещения при электрическом и оптическом возбуждении. Верхний электрод к структуре был изготовлен из OG, перенесённого на пластиковую подложку (рис. 4, вставка). Структура с прижимным OG электродом демонстрировала резистивные свойства, подобные свойствам структуры $\text{Cu}-\text{Bi}_2\text{Se}_3-\text{BeCu}$, но менее стабильные, что, возможно, связано с дефектной структурой тонкого прижимного слоя OG. Это не позволяло провести программирование HRS. От цикла к циклу нестабильность HRS

превышала 20 % (LRS 1 ~ 150 кОм было более стабильно). Улучшение этого параметра можно добиться, улучшив контакт графена с Bi_2Se_3 прямым переносом графенового электрода на поверхность кристалла, что требует отработки технологии переноса на низкоразмерные структуры.

При оптическом возбуждении структура $\text{Au}/\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{OG}$ переключалась в низкоомное состояние LRS 2 (~ 100 кОм), меньшее LRS 1, в которое структура переключалась из HRS электрическим полем. При этом состояние LRS 2 не переходило в HRS в данном диапазоне напряжений смещения, что указывает на возможность влияния длительности, интенсивности и длины волны используемых лазерных импульсов. Полученные результаты были воспроизведены на нескольких изготовленных структурах, все они, имея схожие BAX и $R(U)$, переключались обратимо электрическим полем из HRS в LRS 1 и необратимо при оптическом возбуждении из HRS в LRS 2. Это свидетельствует о более сложном механизме резистивного переключения в таких гетероструктурах при их оптическом возбуждении в условиях изменения электрического поля. Система согласованного контроля длительности и интенсивности оптических и электрических импульсов позволит провести такие эксперименты более детально.

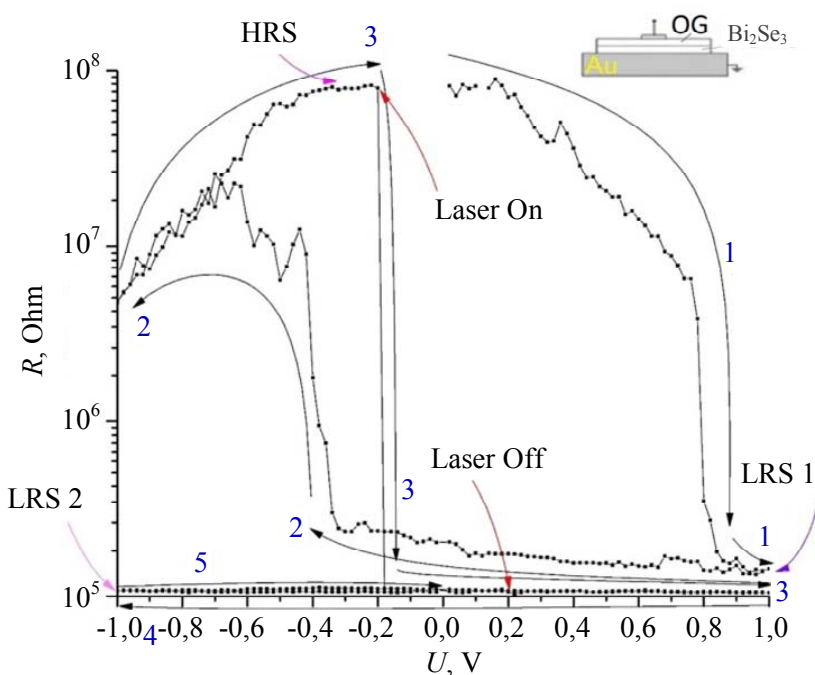


Рис. 4. Управление резистивными состояниями структуры $\text{Au}/\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{OG}$ электрически и оптически. Вставка: схематичное изображение исследуемого образца

Заключение

Изготовлены и исследованы два типа структур Cu/Bi₂Se₃/BeCu и Au/Bi₂Se₃/OG, демонстрирующих пластичность сопротивления при электрическом и оптическом возбуждении. Полученные результаты указывают на перспективность мемристивных структур на основе слоевых халькогенидов Bi₂Se₃ для реализации искусственного синапса для нейроморфных вычислений и обработки оптических сигналов в фотосенсорах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-49-00159. Работы на установках ИПТМ РАН проводились и поддерживались в рамках государственного задания № 075-00296-24-00.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chua L. O. / Nat Electron. 2018. Vol. 1. P. 322.
2. Kapitanova O. O., Emelin E. V., Dorofeev S. G., Evdokimov P. V., Panin G. N., Lee Y., Lee S. / J. Mat. Sci. Tech. 2020. Vol. 38. P. 237.
3. Panin G. N. / Electronics. 2022. Vol. 11. P. 619.
4. Wang W. et al. / Sci. Rep. 2016. Vol. 6. P. 31224.
5. Fu X. et al. / Small. 2019. Vol. 15. Is. 45. P. 1903809.
6. Fu X. et al. / Light Sci. Appl. 2023. Vol. 12. P. 39.
7. Zotov A. V. et al. / Chaos, Solitons & Fractals. 2021. Vol. 141. P. 110542.
8. Sirotkin V. V. / Russian Microelectronics. 2023. Vol. 52. P. 363.
9. Mao Ye et al. / The Journal of Physical Chemistry C. 2021. Vol. 125. Is. 3. P. 1784–1792.
10. Mihailovic I. A. et al. / Journal of Micromechanics and Microengineering. 2021. Vol. 31. № 9.
11. Yin J. et al. / Nature Communications. 2018. Vol. 9. P. 3311.

PACS: 73.63.-b

Photomemristic switchings in bismuth selenide crystals

A. V. Zotov¹, G. N. Panin¹, N. A. Tulina², D. N. Borisenko² and N. N. Kolesnikov²

¹ Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials, Russian Academy of Sciences
6 Osipyanyan st., Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia

² Osipyanyan Institute of Solid-State Physics, Russian Academy of Sciences
2 Academician Osipyanyan st., Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia

Received 2.08.2024; revised 20.11.2024; accepted 1.02.2025

The effect of optical switching of resistive states in structures based on chalcogenide compounds Bi₂Se₃ with copper and graphene electrodes was discovered. A physical model describing the processes occurring during switching was proposed. The obtained results indicate the possibility of using the studied photomemristor structures for neuromorphic computing as artificial synapses, the weight coefficients of which can be set both electrically and optically.

Keywords: chalcogenides; photomemristors; resistive switching; photomemristive states.

REFERENCES

1. Chua L. O., Nat Electron **1**, 322 (2018).
2. Kapitanova O. O., Emelin E. V., Dorofeev S. G., Evdokimov P. V., Panin G. N., Lee Y. and Lee S., J. Mat. Sci. Tech. **38**, 237 (2020).
3. Panin G. N., Electronics **11**, 619 (2022).
4. Wang W. et al., Sci. Rep. **6**, 31224 (2016).
5. Fu X. et al., Small **15** (45), 1903809 (2019).
6. Fu X. et al., Light Sci. Appl. **12**, 39 (2023).
7. Zotov A. V. et al., Chaos, Solitons & Fractals **141**, 110542 (2021).
8. Sirotkin V. V., Russian Microelectronics **52**, 363 (2023).
9. Mao Ye et al., The Journal of Physical Chemistry C **125** (3), 1784–1792 (2021).
10. Mihailovic I. A. et al., Journal of Micromechanics and Microengineering **31** (9), (2021).
11. Yin J. et al., Nature Communications **9**, 3311 (2018).