

УДК 621.383.4  
EDN: GWRPPKPACS: 85.35.Be, 81.05.ue, 85.60.Gz,  
81.07.-b, 42.79.Pw, 85.60.Gz, 85.35.Be, 42.79.Vb**Фотомемристорные сенсоры для автономных систем зрения  
на основе низкоразмерных материалов**

Г. Н. Панин, О. О. Капитанова

*Рассмотрены фотомемристоры на основе двумерных материалов, таких как графен, оксид графена, дисульфиды переходных металлов, и квантовых точек. Показано, что низкоразмерные материалы в фотомемристорных сенсорах позволяют детектировать свет в широком УФ-ИК диапазоне и обрабатывать оптические сигналы в самом сенсоре. Интеллектуальные фотосенсоры со встроенными нейронными сетями, подобные сетчатке глаза, могут быть изготовлены из гибких биосовместимых материалов, и использоваться в автономных сенсорных системах распознавания объектов в реальном времени.*

**Ключевые слова:** графен, низкоразмерные кристаллы, фотомемристор, нейроморфный сенсор, интеллектуальный фотодетектор, автономные нейронные сети.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-5-448-455

**Введение**

Низкоразмерные материалы, такие как двумерные и нульмерные кристаллы семейства графена и его производные, в последнее время активно исследуются для разработки фотомемристорных систем энергоэффективной обработки информации и распознавания образов. Фотомемристивные состояния, контролируемые поляризацией, окислительно-восстановительными процессами или фотоин-

дуцированными структурными переходами, демонстрируют динамическое поведение, необходимое для реализации вычислений и обработки визуальной информации.

Обычная технология современного машинного зрения основана на цифровой архитектуре фон Неймана, в которой блоки сенсоров, памяти и вычислений разделены (рис. 1, сверху). Блоки вычислительных устройств и памяти обрабатывают большие объемы визуальной информации, генерируемой в сенсорах.

**Панин Геннадий Николаевич**<sup>1</sup>, в.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: panin@iptm.ru

**Капитанова Олеся Олеговна**<sup>2,3</sup>, с.н.с., к.х.н.

<sup>1</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук. Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Осипьяна, 6.

<sup>2</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3.

<sup>3</sup> Центр фотоники и 2D-материалов, МФТИ.

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

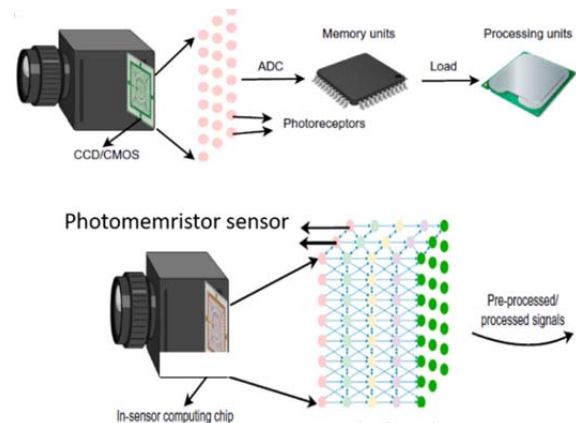
Статья поступила в редакцию 30.07.2024

После доработки 13.09.2024

Принята к публикации 27.09.2024

Шифр научной специальности 2.2.2; 1.3.11

© Панин Г. Н., Капитанова О. О., 2024



**Рис. 1.** Цифровая архитектура фон Неймана (вверху), в которой блоки сенсоров, памяти и вычислений разделены, и схема вычислений в фотомемристорном сенсоре (внизу)

Частое перемещение данных между сенсорами, памятью и процессором, которые часто избыточны для распознавания объекта, приводит к большому энергопотреблению и большим временным задержкам.

Новые двухэлектродные компоненты мемристоры [1–4] и фотомемристоры [5–8], состояния в которых энергонезависимы в отличие от энергозависимых состояний трехэлектродных транзисторов, могут при высокой плотности элементов энергоэффективно обрабатывать электрические и оптические сигналы в памяти и сенсоре (рис. 1, внизу). Это позволяет создать автономное нейроморфное машинное зрение с более высокими характеристиками [9, 10].

### Разработка новых оптоэлектронных элементов для быстрой и энергоэффективной обработки визуальной информации

#### Мемристор и фотомемристор на основе графена, оксида графена и дисульфида молибдена

В 2010 году ряд групп сообщил о новых переключающих элементах мемристорах на основе оксида графена (ОГ) [11–13]. Сопротивление в структуре Al/ОГ/Al с резистивным переключением изменялось на три порядка при пороговом напряжении смещения 0,4 В [12]. Анализ такой структуры показал, что резистивное переключение происходит с образованием проводящих каналов, которые формируются при перестройке  $sp^3$  и  $sp^2$  гибридизации углерода в оксиде графена [14]. Энергонезависимые мемристивные состояния в этих структурах хорошо контролировались при пороговых напряжениях меньше 1 В, что позволяло эффективно обрабатывать электрические сигналы в памяти [15].

В 2016 году был предложен фотомемристор на основе  $MoS_2$  [5], который позволял записывать и считывать мемристивные состояния, используя электрические и оптические импульсы.

На рисунке 2 показаны диаграммы записи, считывания и стирания мемристивных состояний в фотомемристоре на основе  $MoS_2$  оптическими и электрическими импульсами. В фотомемристоре контролировались оптически и электрически восемь энергонезависимых со-

стояний высокого сопротивления (HRS) и низкого сопротивления (LRS). Оптоэлектронный контроль мемристивных состояний открыл возможность биоподобного оптического детектирования и предварительной обработки визуальной информации в самом фотомемристорном сенсоре.

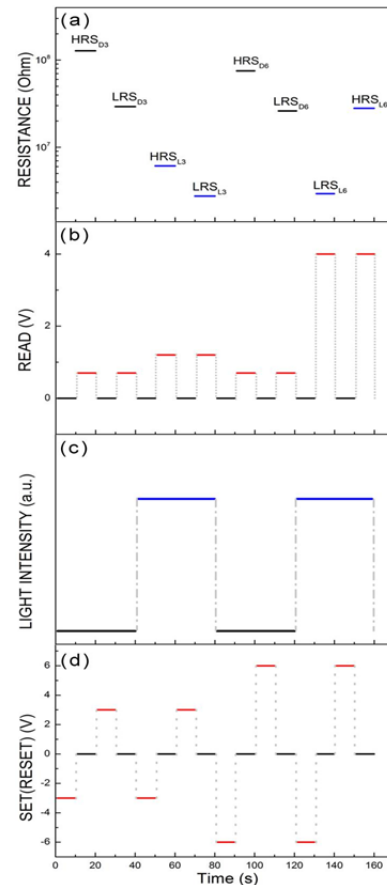
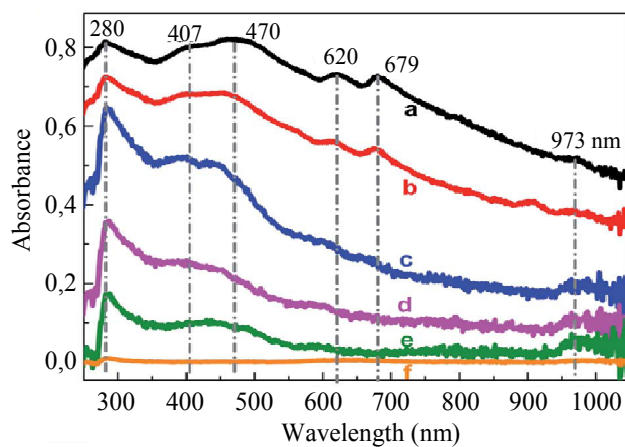


Рис. 2. Диаграммы контроля мемристивных состояний в фотомемристоре на основе  $MoS_2$ , оптическими и электрическими импульсами

### Фотосенсоры на основе низкоразмерных слоевых кристаллов

Низкоразмерные слоевые кристаллы семейства графена и гетероструктуры на их основе, обладающие уникальными свойствами, позволяют создавать фотосенсоры с высокой чувствительностью в широком спектральном диапазоне от УФ до ИК и терагерцового излучения [16, 17]. Важной особенностью таких кристаллов является отсутствие на их поверхности оборванных связей. Это дает возможность встраивать их в монокристаллические КМОП схемы с образованием бездефектных интерфейсов, что существенно улучшает харак-

теристики приборов. Широкополосный датчик изображения на основе графена, встроенного в КМОП технологию, был продемонстрирован в недавней работе [18]. Интеграция КМОП-ИС с графеном и PbS квантовыми точками (КТ) позволила создать широкополосный датчик изображения с высоким пространственным разрешением и высокой чувствительностью в УФ, видимой и ИК области от 300 нм до 2 мкм. Эти результаты указывают на перспективность 2D кристаллов для КМОП технологии изготовления фотосенсоров для широкого спектрального диапазона.



Гетероструктуры на основе 2D кристаллов и КТ демонстрируют контролируемое поглощение в УФ-ИК области [19, 20]. Эффекты квантования, определяемые степенью восстановления ОГ и размером КТ, полученных из графена и MoS<sub>2</sub>, [19] приводят к контролируемому поглощению света с длиной волны от 280 нм до 973 нм (рис. 3).

Функционализация двухслойного графена, перенесённого на подложку Si/SiO<sub>2</sub>, в азотной плазме приводит к формированию КТ структур с поглощением и люминесценцией в УФ и видимой области: 390, 475 и 610–620 нм (рис. 4) [20].

Рис. 3. Спектры поглощения гетероструктур MoS<sub>2</sub>/ОГ с КТ в УФ-ИК диапазоне, полученных при самоорганизации MoS<sub>2</sub> (1,3–1,7 эВ)/ОГ (6–0 эВ) в процессе восстановления оксида графена

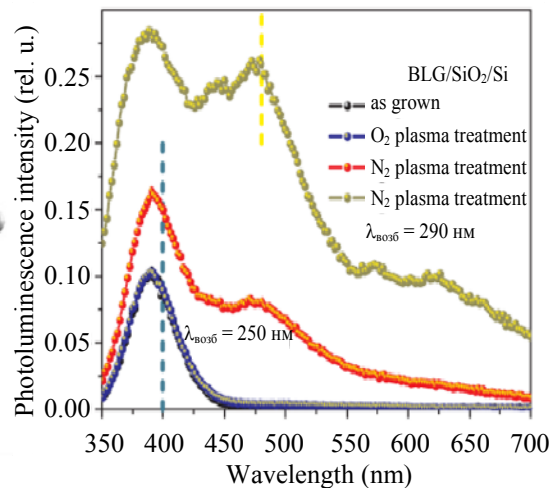
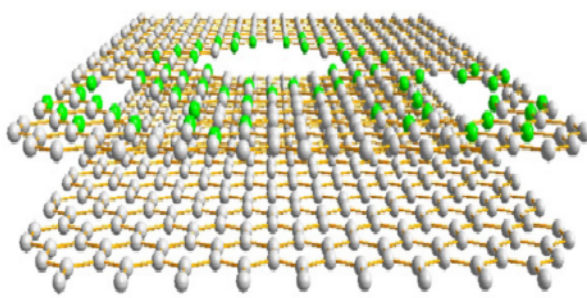


Рис. 4. Два слоя графена после их обработки в плазме азота (слева) и их спектры фотолюминесценции, полученные при возбуждении структуры светом с  $\lambda_{\text{возб}} = 250$  нм или 290 нм

Использование слоевых SnS<sub>2</sub> КТ размером от 6 до 2,5 нм, полученных методом LPE при разных условиях эксфолиации [21], позволяет расширить область поглощения от 2,25 до 3,5 эВ (рис. 5). На основе гетероструктур графен/Sn<sub>x</sub>S<sub>y</sub>

были изготовлены широкополосные фотосенсоры с высокой чувствительностью 35 А·Вт<sup>-1</sup> и высокой обнаружительной способностью  $3,4 \times 10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> [22].

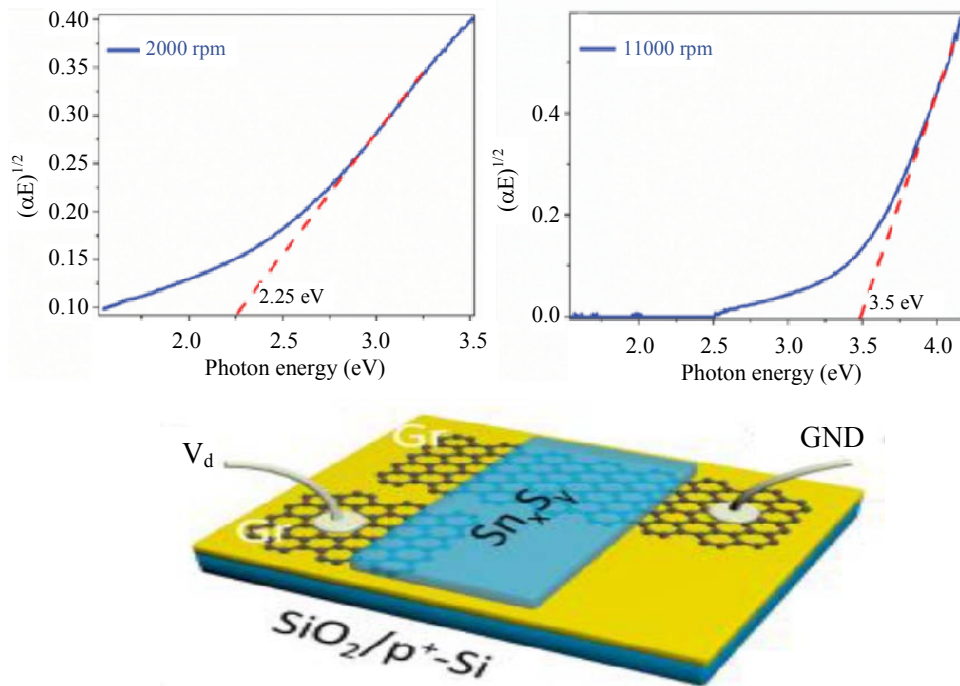


Рис. 5. Спектры поглощения квантовых точек SnS<sub>2</sub> размером 6 и 2,5 нм, полученных методом LPE при разных условиях эксфолиации (2000 и 11000 rpm) (вверху) и схематичное изображение широкополосного фотосенсора на основе гетероструктуры графен/Sn<sub>x</sub>S<sub>y</sub> (внизу).

Использование оксиселенида висмута Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se, чувствительного в ИК спектральной области, дает возможность детектировать объекты в ИК-диапазоне. На рисунке 6 показана матрица 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se фотодетекторов, которая позволяет получить изображения цифр 1, 2 и 3 при освещении светом 1,55 мкм, 1,31 мкм и 1,2 мкм соответственно [23].

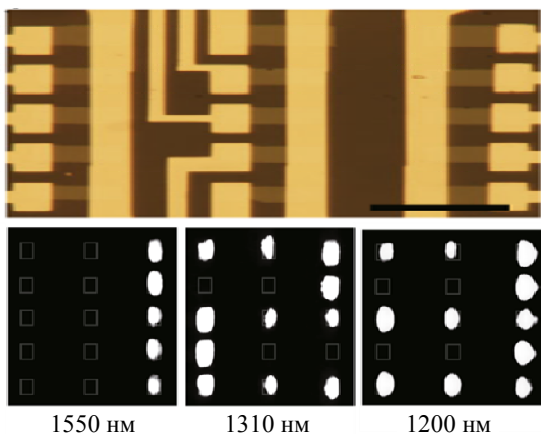


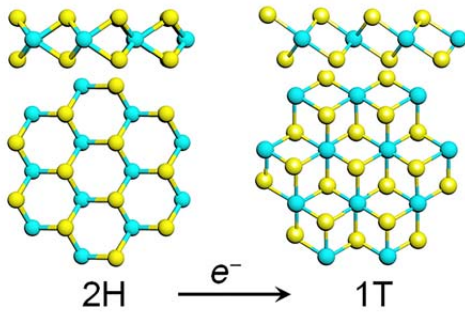
Рис. 6. Изображение 3×5 матрицы фотосенсоров на основе 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se (вверху) и изображения цифр 1, 2 и 3 при освещении ее светом 1,55 мкм, 1,31 мкм и 1,2 мкм (внизу). Масштабная метка – 10 мкм

При сканировании объекта фотодатчик определяет ИК-отражение структуры путем измерения фототоков, регистрирует и преобразует их в изображения. Такой фотодетектор имеет высокую фоточувствительность 65 А/Вт на 1,2 мкм и сверхбыстрый фотоотклик ~ 1 пс при комнатной температуре, что соответствует ограниченной материалу полосе пропускания до 500 ГГц. Фотомемристивные переключения в кристаллах селенида висмута при ИК возбуждении были недавно продемонстрированы [24].

### Фотоиндуцированные фазовые переходы в MoS<sub>2</sub>

Двумерные кристаллы демонстрируют также уникальные сверхбыстрые фотоиндуцированные фазовые переходы. Обратимый фазовый переход в MoS<sub>2</sub> из полупроводниковой фазы 2H в металлическую фазу 1T, индуцированный зарядом (рис. 7), происходит за сверхкороткие времена и может контролироваться фемтосекундным лазером [25–28].





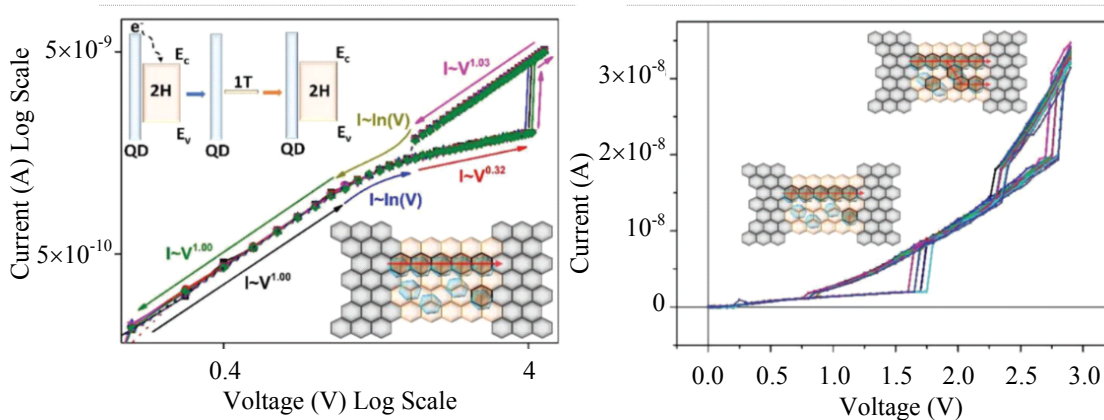
**Рис. 7. Фазовый переход в  $\text{MoS}_2$  из полупроводниковой 2H в металлическую 1T фазу, индуцированный зарядом**

Это позволяет создать интеллектуальные фотосенсоры со сверхбыстрой обработкой оптической информации для разных приложений.

Фотоиндуцированный фазовый переход был использован для динамического переключения фотомемристорного сенсора на основе  $\text{MoS}_2$  QDNS [6, 7]. Изменение тока и

температуры в такой структуре при возбуждении ее светом приводит к динамическому фотомемристивному переключению, контролируемому структурным фазовым переходом. На рисунке 8 показаны мемристивные состояния, связанные с 2H и 1T фазами  $\text{MoS}_2$ , которые переключались светом с длиной волны 532 нм и напряжением смещения 1, 7 и 2,7 В.

Фазовые переходы, контролируемые возбуждением КТ, приводят к многоуровневым состояниям, подобным состояниям в биологическом синапсе. Структуры с КТ разного размера и разного состава формируют фотоиндуцированный заряд и определяют геометрию каналов резистивного переключения при возбуждении их светом с разной длиной волны. Такой фотомемристорный сенсор на основе фотоиндуцированного фазового перехода может быть использован для сверхбыстрой обработки оптических сигналов и изображений.

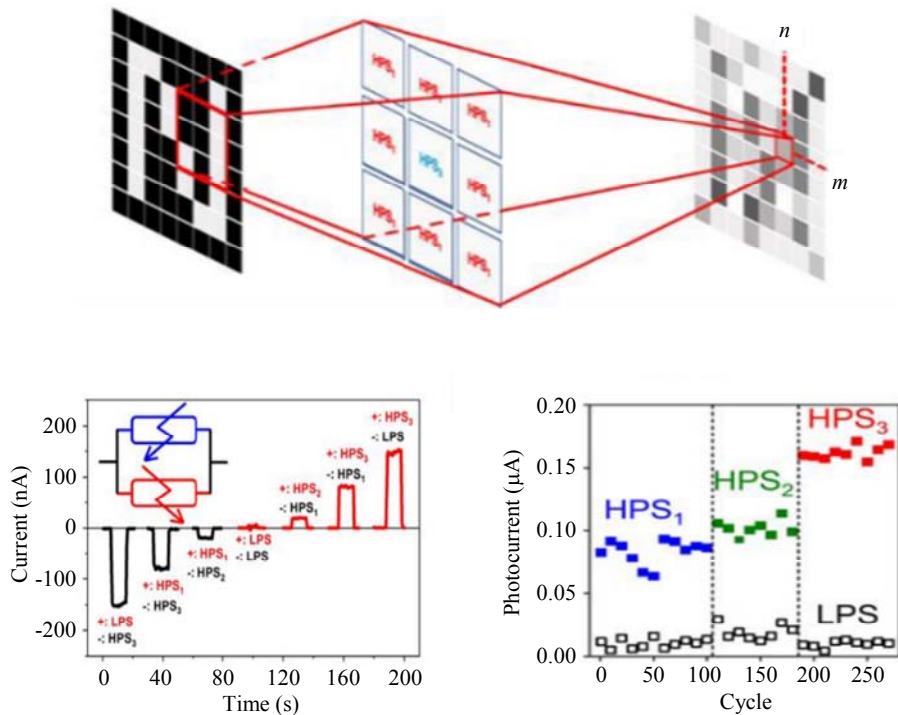


**Рис. 8. Мемристивные состояния в  $\text{MoS}_2$  QDNS, связанные с 2H и 1T фазами**

### **Фотомемристорная нейронная сеть, встроенная в сенсор, для распознавания образов**

Фотомемристорный сенсор на основе  $\text{G}/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$  с настраиваемой фоточувствительностью и встроенной нейронной сетью позволяет фотодетектирование, запоминание и предварительную обработку визуальной информации в самом сенсоре без физического разделения на детектор, память и процессор [8]. На рисунке 8 показана  $3 \times 3$  матрица фотомемристоров, которые включены навстречу друг другу для получения фотоотклика с разным знаком. Это позволяет с высокой точностью распознавать детектируемые оптические сигналы и визуальные данные.

Реконфигурируемая чувствительность фотомемристора, модулируемая потоком заряда и/или фотонов, проходящих через него, энергонезависима. Фотомемристор имеет простую двухполюсную архитектуру, в которой фотовозбужденные носители заряда и подвижные ионы связываются, что приводит к смещению и заземлению гистерезиса в вольтамперных характеристиках. Энергонезависимые состояния фотомемристоров реализуют полную вычислительную логику с операциями считывания состояний фотоответа. При этом один и тот же фотомемристор выполняет функции логического устройства и памяти, используя фотоотклик в качестве переменной физического состояния вместо света, напряжения или сопротивления.



**Рис. 9.** Фотомемристорный сенсор на основе  $3 \times 3$  матрицы из  $G/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$  с настраиваемой фоточувствительностью и встроенной нейронной сетью для детектирования и распознавания изображения (вверху). Фотомемристорные состояния в нейронной сети формируются набором фотомемристоров с противоположной полярностью (внизу). Показаны состояния низкого фотоотклика (LPS) и три состояния высокого фотоотклика ( $\text{HPS}_1$ ,  $\text{HPS}_2$ ,  $\text{HPS}_3$ )

Фотомемристоры с разной полярностью протекания фототока демонстрирует большой потенциал для получения высокой точности детектирования и вычислений в памяти с извлечением характерных признаков и распознаванием изображений подобно биологическому нейроморфному зрению. Энергонезависимые фотомемристорные состояния могут обрабатываться в самом сенсоре в реальном времени, подобно обработке сигналов в сетчатке глаза. Двухэлектродные фотомемристоры на основе двумерных  $G/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ , могут обеспечить высокую степень интеграции и высокое пространственное разрешение, необходимые для современных систем машинного зрения.

### Заключение

Фотомемристорные сенсоры на основе низкоразмерных кристаллов семейства графена представляют собой новый класс оптоэлектронных устройств, совместимых с технологией КМОП. Фотомемристорные состояния в структурах на основе двумерных материалов и

квантовых точек могут контролироваться электрически и оптически в широком УФ-ИК диапазоне. Фотомемристорное устройство со встроенной нейронной сетью позволяет детектировать, запоминать и автономно распознавать визуальную информацию подобно биологическому зрению.

*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. / IEEE Transactions on circuit theory 1971. Vol. 18. № 5. P. 507. doi: 10.1109/TCT.1971.1083337
2. Panin G. N. et al. / AIP Conf. Proc. 2007. Vol. 893. P. 743.
3. Strukov D., Snider G., Stewart D. et al. / Nature 2008. Vol. 453. P. 80–83. [https:// doi.org/10.1038/nature06932](https://doi.org/10.1038/nature06932)

4. Chua L. O. / Nat Electron 2018. Vol. 1. P. 322.  
doi: 10.1038/s41928-018-0074-4
5. Wang W., Panin G., Fu X. et al. / Sci Rep 2016. Vol. 6. P. 31224. [https:// doi.org/10.1038/srep31224](https://doi.org/10.1038/srep31224)
6. Fu X., Zhang L., Cho H. D., Kang T. W., Fu D., Lee D., Lee S. W., Li L., Qi T., Chan A. S., Yunusov Z. A., Panin G. N. / Small. 2019. Vol. 15. № 45. P. 1903809.  
doi: 10.1002/sml.201903809
7. Panin G. N. / Chaos, Solitons and Fractals 2021. Vol. 142. P. 110523.  
doi: 10.1016/j.chaos.2020.110523
8. Fu X., Li T., Cai B., Miao J., Panin G. N., Ma X., Wang J., Jiang X., Li Q., Dong Y., Hao C., Sun J., Xu H., Zhao Q., Xia M., Song B., Chen F., Chen X., Lu W., Hu W. / Light Sci. Appl. 2023. Vol. 12. P. 39.  
doi: 10.1038/s41377-023-01079-5
9. Panin G. N. / Electronics. 2022. Vol. 11. P. 619.  
doi: 10.3390/electronics11040619
10. Panin G. N., Kapitanova O. O. Memristive Systems Based on Two-Dimensional Materials. Advances in Memristor Neural Networks – Modeling and Applications. InTech, 2018. [http://dx. doi.org/10.5772/intechopen.78973](http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78973)
11. He C. L., Zhuge F., Zhou X. F., Li M., Zhou G. C., Liu Y. W., Wang J. Z., Chen B., Su W. J., Liu Z. P., Wu Y. H., Cui P., Li R.-W. / Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95. P. 232101.
12. Panin G. N. et al. / Jap. J. App. Phys. 2011. Vol. 50. P. 070110. doi: 10.3938/jkps.64.1399
13. Jeong H. Y., Kim J. Y., Kim J. W., Hwang J. O., Kim J.-E., Lee J. Y., Yoon T. H., Cho B. J., Kim S. O., Ruoff R. S., Choi S.-Y. / Nano Lett. 2010. Vol. 10. P. 4381.
14. 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.  
doi: 10.1016/j.jmst.2019.07.042
15. Панин Г. Н., Капитанова О. О. / Российские Нанотехнологии. 2021. № 16 (6). С. 734–750.
16. Xia F., Wang H., Xiao D. et al. / Nature Photon. 2014. Vol. 8. P. 899–907.  
[https:// doi.org/10.1038/nphoton.2014.271](https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.271)
17. Ubrig N., Ponomarev E., Zultak J. et al. / Nat. Mater. 2020. Vol. 19. P. 299–304.  
[https:// doi.org/10.1038/s41563-019-0601-3](https://doi.org/10.1038/s41563-019-0601-3)
18. Goossens S., Navickaite G., Monasterio C. et al. / Nature Photon. 2017. Vol. 11. P. 366–37.  
[https:// doi.org/10.1038/nphoton.2017.75](https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.75)
19. Wang W., Kapitanova O. O. et al. / RSC Adv. 2018. Vol. 8. P. 2410.
20. Kovaleva N. N. et al. / 2D Materials. 2019. Vol. 6. № 4. P. 045021.
21. Fu Xiao, Panin G. N. et al. / Nanoscale. 2017. Vol. 9. P. 1820.
22. Fu Xiao et al. / Materials Horizons. 2022. Vol. 9. № 12. P. 3095–3101.
23. Yin J., Tan Z., Hong H. et al. / Nat Commun. 2018. Vol. 9. P. 3311. [https:// doi.org/10.1038/s41467-018-05874-2](https://doi.org/10.1038/s41467-018-05874-2)
24. Зотов А. В., Панин Г. Н., Тулина Н. А., Борисенко Д. Н., Колесников Н. Н. / XXVII Международной научно-технической конференции «Фотоэлектроника и приборы ночного видения». – Москва, 2024. С. 308.
25. Li W., Qian X., Li J. / Nat Rev Mater. 2021. Vol. 6. P. 829–846. [https:// doi.org/10.1038/s41578-021-00304-0](https://doi.org/10.1038/s41578-021-00304-0)
26. Guo Yinsheng, Sun Dezheng, Ouyang Bin, Raja Archana, Song Jun, Heinz Tony F., Brus Louis E. / Nano Lett. 2015. Vol. 15. № 8. P. 5081–5088.  
[https:// doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01196](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01196)
27. Peng B., Zhang H., Chen W. et al. / npj 2D Mater Appl. 2020. Vol. 4. P. 14.  
[https:// doi.org/10.1038/s41699-020-0147-x](https://doi.org/10.1038/s41699-020-0147-x)
28. Chen H., Zhang J., Kan D., He J., Song M., Pang J., Wei S., Chen K. / Crystals. 2022. Vol. 12. № 10. P. 1381. [https:// doi.org/10.3390/cryst12101381](https://doi.org/10.3390/cryst12101381)

PACS: 85.35.Be, 81.05.ue, 85.60.Gz,  
81.07.-b, 42.79.Pw, 85.60.Gz, 85.35.Be, 42.79.Vb

## Photomemristor sensors for autonomous vision systems based on low-dimensional materials

*G. N. Panin<sup>1</sup> and O. O. Kapitanova<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials, Russian Academy of Sciences  
6 Osipyan st., Chernogolovka, Moscow region, 142432, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University  
Bd. 3, 1 Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

<sup>3</sup> Center for Photonics and 2D Materials Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

*Received 30.07.2024; revised 13.09.2024; accepted 27.09.2024*

***Photomemristors based on 2D materials such as graphene, graphene oxide, transition metal disulfides, and quantum dots are considered. It is shown that low-dimensional materials in photomemristor sensors***

***allow detecting light in a wide UV-IR range and processing optical signals in the sensor itself. Intelligent photosensors with embedded neural networks, similar to the retina, can be made of flexible biocompatible materials and used in autonomous sensor systems for real-time object recognition.***

***Keywords:*** graphene; low-dimensional crystals; photomemristor; neuromorphic sensor, intelligent photodetector, autonomous neural networks.

## REFERENCES

1. Chua L., IEEE Transactions on circuit theory **18** (5), 507 (1971). doi: 10.1109/TCT.1971.1083337
2. Panin G. N. et al., AIP Conf. Proc. **893**, 743 (2007).
3. Strukov D., Snider G., Stewart D. et al., Nature **453**, 80 (2008). [https:// doi.org/10.1038/nature06932](https://doi.org/10.1038/nature06932)
4. Chua L. O., Nat Electron **1**, 322 (2018). doi: 10.1038/s41928-018-0074-4
5. Wang W., Panin G., Fu X. et al., Sci Rep. **6**, 31224 (2016). [https:// doi.org/10.1038/srep31224](https://doi.org/10.1038/srep31224)
6. Fu X., Zhang L., Cho H. D., Kang T. W., Fu D., Lee D., Lee S. W., Li L., Qi T., Chan A. S., Yunusov Z. A. and Panin G. N., Small. **15** (45), 1903809 (2019). doi: 10.1002/sml.201903809
7. Panin G. N., Chaos, Solitons and Fractals **142**, 110523 (2021). doi: 10.1016/j.chaos.2020.110523
8. Fu X., Li T., Cai B., Miao J., Panin G. N., Ma X., Wang J., Jiang X., Li Q., Dong Y., Hao C., Sun J., Xu H., Zhao Q., Xia M., Song B., Chen F., Chen X., Lu W. and Hu W., Light Sci. Appl. **12**, 39 (2023). doi: 10.1038/s41377-023-01079-5
9. Panin G. N., Electronics **11**, 619 (2022). doi: 10.3390/electronics11040619
10. Panin G. N. and Kapitanova O. O., Memristive Systems Based on Two-Dimensional Materials. Advances in Memristor Neural Networks, Modeling and Applications. InTech, 2018. [http://dx. doi.org/10.5772/intechopen.78973](http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78973)
11. He C. L., Zhuge F., Zhou X. F., Li M., Zhou G. C., Liu Y. W., Wang J. Z., Chen B., Su W. J., Liu Z. P., Wu Y. H., Cui P. and Li R.-W., Appl. Phys. Lett. **95**, 232101 (2009).
12. Panin G. N. et al., Jap. J. App. Phys. **50**, 070110 (2011). doi: 10.3938/jkps.64.1399
13. Jeong H. Y., Kim J. Y., Kim J. W., Hwang J. O., Kim J.-E., Lee J. Y., Yoon T. H., Cho B. J., Kim S. O., Ruoff R. S. and Choi S.-Y., Nano Lett. **10**, 4381 (2010).
14. 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). doi: 10.1016/j.jmst.2019.07.042
15. Panin G. N. and Kapitanova O. O., Nanobiotechnology Reports **16** (6), 706 (2021).
16. Xia F., Wang H., Xiao D. et al., Nature Photon. **8**, 899 (2014). [https:// doi.org/10.1038/nphoton.2014.271](https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.271)
17. Ubrig N., Ponomarev E., Zultak J. et al., Nat. Mater. **19**, 299 (2020). [https:// doi.org/10.1038/s41563-019-0601-3](https://doi.org/10.1038/s41563-019-0601-3)
18. Goossens S., Navickaite G., Monasterio C. et al., Nature Photon. **11**, 366 (2017). [https:// doi.org/10.1038/nphoton.2017.75](https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.75)
19. Wang W., Kapitanova O. O. et al., RSC Adv. **8**, 2410 (2018).
20. Kovaleva N. N. et al., 2D Materials **6** (4), 045021 (2019).
21. Fu Xiao, Panin G. N. et al., Nanoscale **9**, 1820 (2017).
22. Fu Xiao et al., Materials Horizons **9** (12), 3095 (2022).
23. Yin J., Tan Z., Hong H. et al., Nat Commun. **9**, 3311 (2018). [https:// doi.org/10.1038/s41467-018-05874-2](https://doi.org/10.1038/s41467-018-05874-2)
24. Zotov A. V., Panin G. N., Tulina N. A., Borisenko D. N. and Kolesnikov N. N. Proc. XXVII Intern. Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices. Moscow, 2024. p. 308.
25. Li W., Qian X. and Li J., Nat Rev Mater. **6**, 829 (2021). [https:// doi.org/10.1038/s41578-021-00304-0](https://doi.org/10.1038/s41578-021-00304-0)
26. Guo Yinsheng, Sun Dezheng, Ouyang Bin, Raja Archana, Song Jun, Heinz Tony F. and Brus Louis E., Nano Lett. **15** (8), 5081 (2015). [https:// doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01196](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01196)
27. Peng B., Zhang H., Chen W. et al., npj 2D Mater Appl. **4**, 14 (2020). [https:// doi.org/10.1038/s41699-020-0147-x](https://doi.org/10.1038/s41699-020-0147-x)
28. Chen H., Zhang J., Kan D., He J., Song M., Pang J., Wei S. and Chen K., Crystals. **12** (10), 1381 (2022). [https:// doi.org/10.3390/cryst12101381](https://doi.org/10.3390/cryst12101381)