

ФОТОМЕМРИСТОРНЫЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО АВТОНОМНОГО НЕЙРОМОРФНОГО ЗРЕНИЯ

Панин Г. Н.

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Россия

Нейроморфные вычисления в сенсоре на основе фотомемристоров позволяют создать компактную, автономную и энергоэффективную систему детектирования, запоминания и распознавания визуальной информации в реальном времени для использования в автопилотируемом транспорте, персональной медицине и других приложениях. Появление новых двумерных материалов семейства графена открывает уникальные возможности быстрой обработки электрических и оптических сигналов в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного и терагерцового излучения. Энергонезависимые резистивные состояния в мемристорных структурах, изготовленных на основе двумерных кристаллов и квази-нульмерных квантовых точек, могут контролироваться светом и электрической поляризацией, фотоиндуцированными структурными переходами или перестройкой sp^2 - sp^3 гибридизации атомов углерода в электрическом поле. Такие устройства имеют высокую фоточувствительность и демонстрируют динамическое поведение, необходимое для нейроморфных вычислений непосредственно в сенсоре, что позволяет уменьшить энергетические и временные затраты, связанные с переносом данных между сенсором, памятью и процессором. Это открывает возможность классификации и распознавания объектов в обученном сенсоре, подобно обработке оптических сигналов в сетчатке глаза. В статье рассмотрены фотомемристоры на основе низкоразмерных материалов, таких как графен, оксид графена, диаман, слоистые квантовые точки для создания систем нейроморфного зрения. Показано, что такие материалы можно использовать для интеллектуальной визуализации в широком оптическом диапазоне с предобработкой информации в сенсоре. Интеллектуальные сенсоры со встроенными нейронными сетями могут быть изготовлены из биосовместимых гибких материалов и использоваться для создания автономного энергоэффективного нейроморфного зрения.

Ключевые слова – двумерные кристаллы, интеллектуальные фотосенсоры, квантовые точки, мемристорные структуры, фотомемристор.

Эта работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-49-00159. Работы на экспериментальных установках Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук проводились и поддерживались в рамках государственного задания № 075-00295-25-00.

Панин Г.Н., panin@iptm.ru

Фотомемристорные сенсоры для широкополосного автономного нейроморфного зрения

Панин Г. Н.

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Россия

Введение

В последние годы становится все более очевидной необходимость разработки энергоэффективных, компактных и быстрых оптоэлектронных устройств для машинного зрения. В 2021 году был продемонстрирован процессор DOJO (Рис. 1), разработанный для искусственного интеллекта Tesla Autopilot для обработки и распознавания визуальной информации [1].

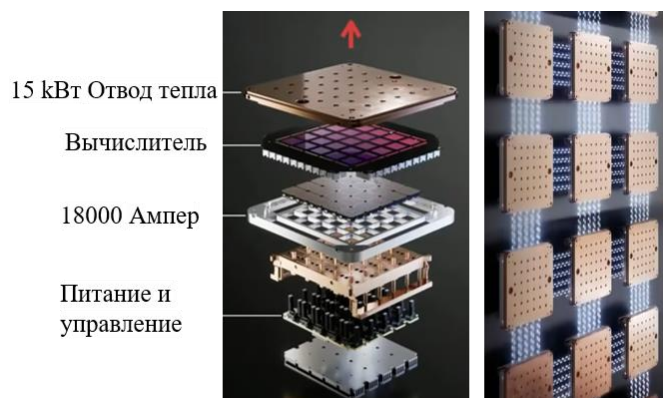


Рис. 1. Набор плат D1 процессора DOJO

Процессор изготовлен по 7 нм КМОП технологии. Плата D1 такого процессора содержит 25 микросхем и потребляет 15 кВт. Процессор с набором 3000 D1 плат выполняет 1.1 EFLOP ($\sim 10^{18}$ операций в секунду) и потребляет 45 МВт. Годовое потребление мощности, вырабатываемой всеми электростанциями в ЕЭС России, составляет $\sim 160\,000$ МВт [2]. Эти данные указывают на сверхвысокое энергопотребление современных вычислительных систем и необходимость

разработки более энергоэффективной компонентной базы искусственного интеллекта для обработки визуальной информации в реальном времени.

Технология машинного зрения

Обычная технология машинного зрения основана на цифровой архитектуре фон Неймана, в которой блоки сенсоров, памяти и вычислений разделены (Рис. 2).

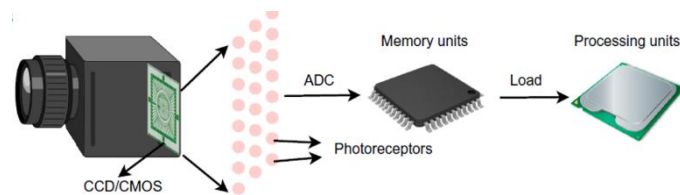


Рис. 2. Технология машинного зрения с архитектурой фон Неймана

Сенсоры генерируют большие объемы визуальных данных. Перемещение этих данных между сенсорами, памятью и процессором, часто избыточных для решения определенной задачи, приводит к большому энергопотреблению и большим задержкам.

Появление мемристоров с энергонезависимой памятью [3-7], которые могут обрабатывать электрические сигналы в памяти вблизи сенсора, объединяя память и процессор, позволяет создать более быстрое и энергоэффективное машинное зрение.

Мемристорные структуры на основе низкоразмерных кристаллов

Мемристорные структуры на основе низкоразмерных кристаллов были продемонстрированы в ряде работ [4, 6]. Квази-одномерные наностержни (НС) ZnO, легированные Li, Fe (Mn), проявляют мультиферроидные свойства и демонстрируют два спиновых состояния, контролируемых магнитным полем [8] и два ферроэлектрических состояния,

контролируемых поляризацией электрического поля [4] (Рис. 3). Гистерезис в кривых намагниченности НС ZnO (Li,Fe,Mn) при изменении магнитного поля при 300К и 77К указывает на формирование ферромагнитных состояний в легированных НС, которые сохраняются до комнатной температуры. Магнитно-силовая микроскопия выявляет магнитные домены, направления спиновой поляризации в которых можно переключать в магнитном поле (Рис. 3).

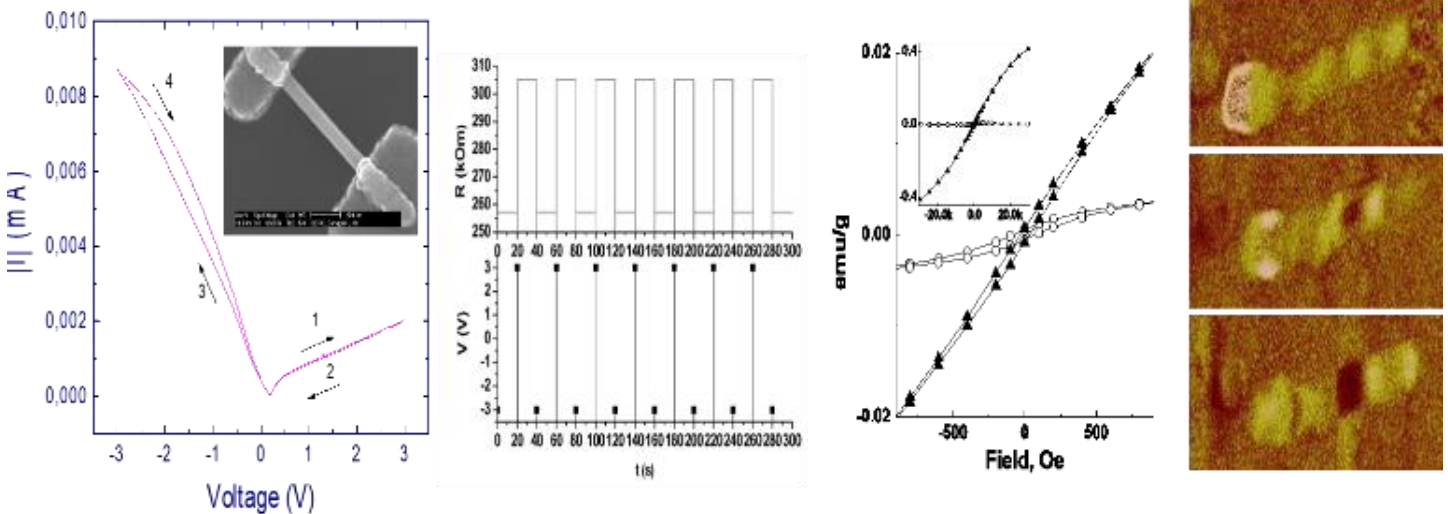


Рис. 3. Вольтамперная характеристика ZnO НС, легированного Li, Fe и диаграммы напряжения переключения сопротивления от времени (слева). Вставка: СЭМ изображение ZnO НС с Au электродами, изготовленными электронно-лучевой литографией. Кривые намагниченности ZnO НС (Li,Fe,Mn) при 300К (кружки) и 77К (треугольники). Вставка: кривые намагниченности НС в магнитном поле +/- 25kOe. Изображения магнитных доменов в ZnO: Mn, Li НС, полученных магнитной силовой микроскопией при 300К, для которых спин вверх (светлый контраст) и спин вниз (темный контраст) (справа).

Это дает возможность записи и считывания в мультиферроидном НС ZnO (Li,Fe,Mn) двух состояний, контролируемых поляризацией электрического поля, и двух спиновых состояний, контролируемых магнитным полем.

Резистивные состояния в углеродных низкоразмерных структурах на основе GO, G, биграфена и диамана, как было показано [6, 9, 10], хорошо контролируются изменением sp^3 - sp^2 гибридизации атомов углерода в электрическом поле при относительно малых напряжениях смещения ($<1V$) (Рис. 4, 5). Наноструктуры демонстрируют резистивное переключение из состояния с высоким сопротивлением (HRS) в состояние с низким сопротивлением (LRS) и хорошую воспроизводимость HRS и LRS при

многократных циклах переключения. Показано, что формирование одной sp^3 связи на 10^6 sp^2 -связей в углеродных наноструктурах, таких как нанотрубки, уменьшает проводимость наноструктур на 50% [11].

Структурный фазовый переход при формировании sp^3 углеродных связей в биграфене, обработанном водородом, с образованием алмазного слоя диамана C_2H , был обоснован теоретически в работе [12]. Атомы водорода с двух сторон инициируют «адгезию» атомов углерода, расположенных друг над другом в соседних слоях (Рис. 6).

C_2H диаман стабильнее CH графана и имеет прямую запрещенную 3.12 эВ (2.94эВ).

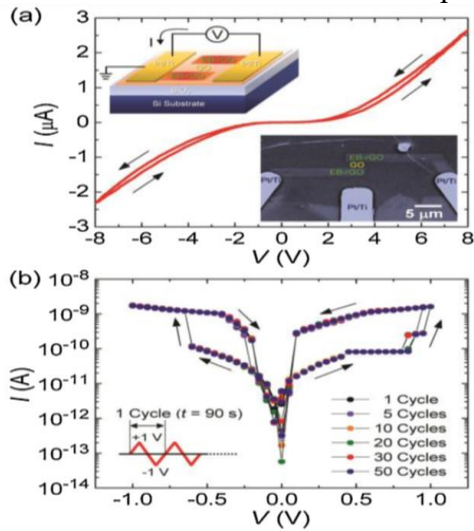


Рис. 4. (a) Вольтамперные характеристики (без формирующего напряжения) латеральной мемристивной гетероструктуры EB-rGO/GO/EB-rGO, полученной облучением электронным пучком с $D = 200 \text{ mA C/cm}^2$ при $E_c = 3 \text{ кВ}$ [6]. Верхняя и нижняя вставки в (a) показывают схему измерения ВАХ и СЭМ изображение, изготовленного EB-rGO/GO/EB-rGO мемристора. (b) Вольтамперные характеристики мемристивной гетероструктуры после приложения формирующего напряжения (20 В, 15 мин) для 1-50 циклов переключения.

Моделирование наноструктуры биграфен-диаман в электрическом поле (Рис. 7) показывает, что слой диамана в 1 нм термодинамически стабилен, а электрическое поле $\sim 10^7 \text{ В/см}^2$ приводит к понижению барьера расщепления [10]. В электрическом поле $\sim 10^8 \text{ В/см}^2$ барьер понижается в два раза (Рис. 7). Реакция связей C-O на электрическое поле объясняется их высокой полярностью.

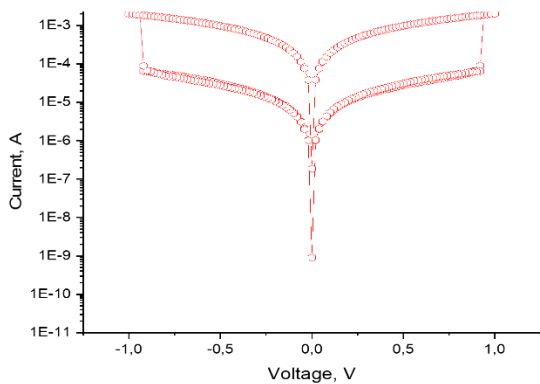


Рис. 5. Вольтамперные характеристики наноструктуры Al/Cr/биграфен/диаман/биграфен/Al/Cr на подложке $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, сформированной облучением биграфена

электронным пучком.

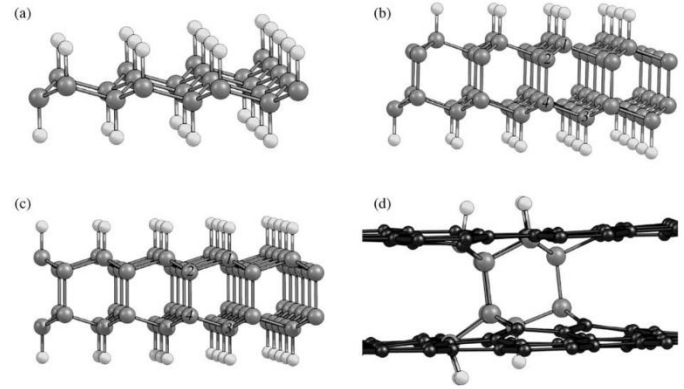


Рис. 6. Атомные структуры графена (a), диамана (b), диамана II (c) и схема образования диаманового ядра в исходном биграфене (d).

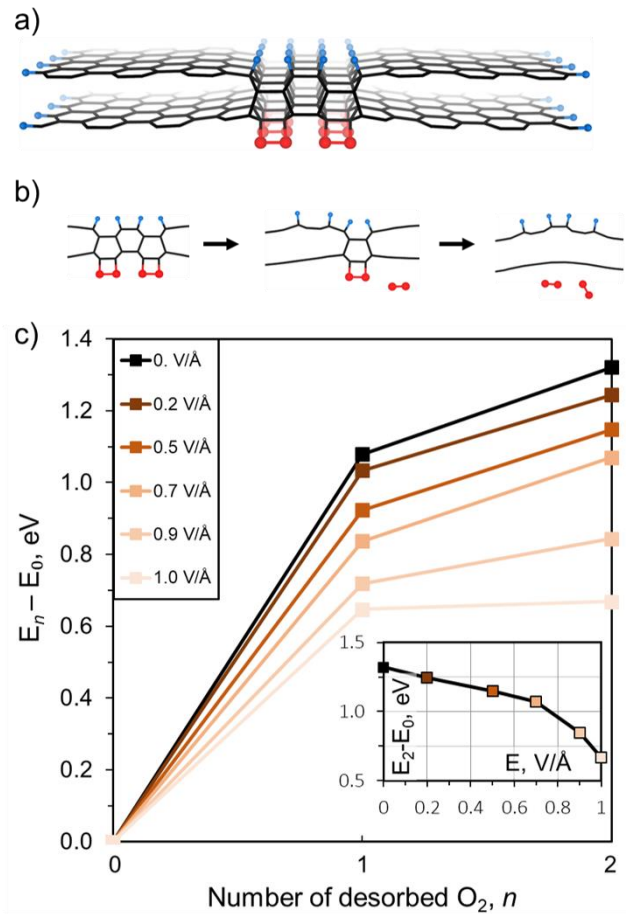


Рис. 7. (a) Два слоя графена с атомами H с одной стороны (синий) и пероксидными кислородными группами с другой (красный). (b) Стадии отрыва кислородных групп, $\text{sp}^3\text{-sp}^2$ структурные переходы: энергия исходной структуры (E_0), отрыв одной кислородной группы (E_1) и отрыв двух кислородных групп (E_2). (c) Зависимость барьера расщепления диамана при десорбции одной или двух кислородных групп от приложенного электрического поля. Вставка - зависимость барьера от электрического поля при десорбции двух кислородных групп.

Это коррелирует с полученными экспериментальными данными, которые указывают на нанокластерное образование диамана и переключение структур при напряжениях порядка 1 В. Слой диамана <1 нм расслаивается на двухслойный графен. При ширине слоя >1 нм барьер для расщепления алмазных кластеров возрастает от 0,7 эВ/ O₂ до 2,4 эВ/ O₂. Эти данные указывают на возможность контроля мемристивных состояний в структурах биграфен/диаман размером 1 нм.

Оптический мемристор. Оптоэлектронные устройства

В 2017 г. исследователи из Оксфордского университета и университетов Эксета и Мюнстера предложили фотонный синапс или оптический мемристор [13], изготовленный на основе волновода с островками GST и контролируемый оптически наведенным фазовым переходом. На Рис. 8 показано 70 интегрированных фотонных синапсов на чипе, каждый из которых позволяет контролировать 3 - 5 синаптических веса при переключении между кристаллическим и аморфным состояниями GST с относительным изменением коэффициента пропускания ($\Delta T/T_0$). Основной недостаток оптического мемристора – это низкий уровень масштабируемости оптических

элементов для встраивания их в электронные интегральные схемы.

Исследователи из университетов Сунгюнкан, Ханьян, Калифорнийского и Стэнфордского университетов в 2018 г. предложили искусственный опто-нейронный синапс (ONS) [14], который представляет собой гибридное оптоэлектронное устройство, состоящее из фотодетектора и синаптического транзистора для около сенсорной обработки оптического сигнала (Рис. 9). Это оптоэлектронное устройство позволяло контролировать состояния проводимости в темноте и при облучении устройства красным, зеленым и синим светом.

Фотомемристорные сенсоры

В 2016 г. исследователи из ИПТМ РАН, университетов Донггук и Ухань предложили фотомемристор на основе MoS₂ [15], который позволял детектировать свет, записывать и считывать фотомемристивные состояния в самом фотомемристоре. На Рис. 10 показаны диаграммы формирования и контроля мемристивных состояний MoS₂ фотомемристора для разных напряжений смещения при возбуждении его импульсами лазера с длиной волны 532 нм. Сформированные состояния высокого сопротивления и состояния низкого сопротивления энергонезависимы и контролируются светом при напряжении смещения -3÷+3 В.

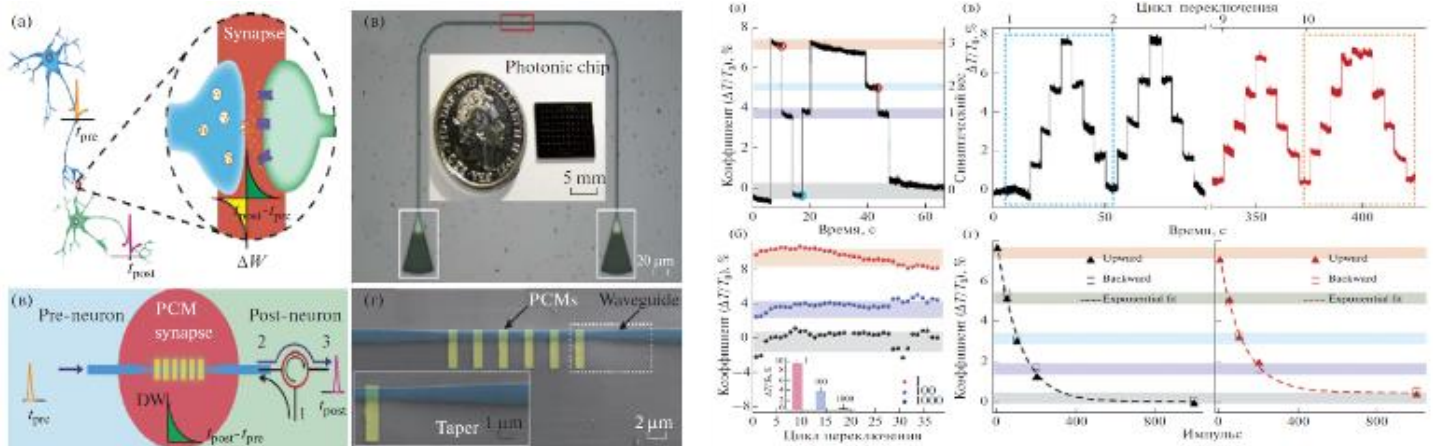


Рис. 8. Структура биологических пред-нейрона, синапса и пост-нейрона (а). Схема фотонного синапса, моделирующая функцию биологического синапса (б). 70 интегрированных фотонных синапсов на фотонном чипе размером 12x12 мм, сопоставимом с размером монеты (в). Изображения волновода с островками GST (г). Синаптические веса при переключении между кристаллическим и аморфным состояниями GST с относительным изменением коэффициента пропускания ($\Delta T/T_0$) (правая панель а, б, в, г). Оптические импульсы 50 нс, 243 пДж, $\lambda=1060$ нм.

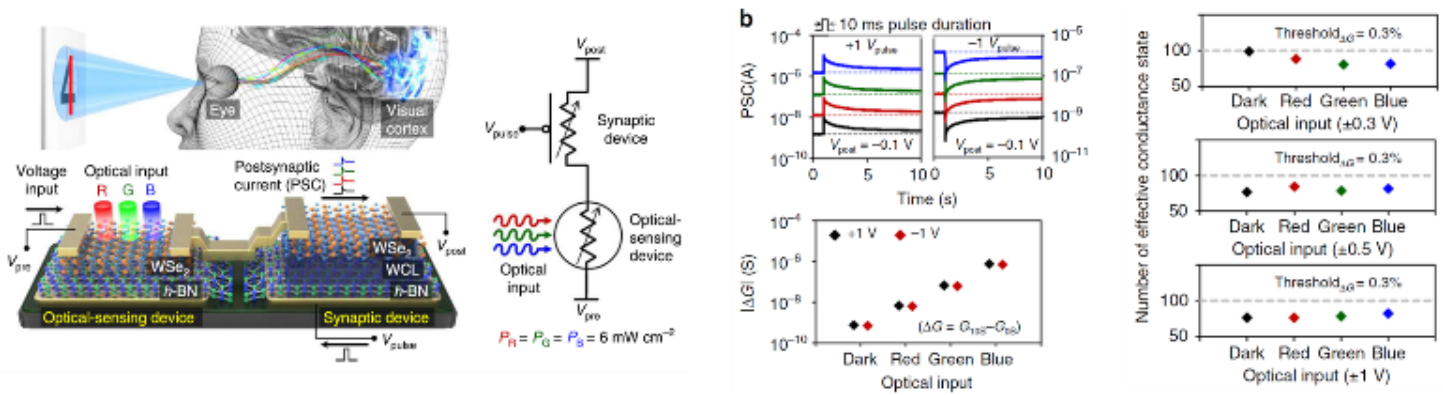


Рис. 9. ONS устройство, интегрированное с фотодетектором h-BN/WS₂, и его электрическая схема. Импульсное возбуждение структуры ONS лазером с длинами волн 655 нм, 532 нм, 405 нм и ее фотоотклик (PSC), изменение проводимости (ΔG) и число контролируемых в ней состояний проводимости.

Фотомемристор позволяет проводить оптическое детектирование и обработку оптических сигналов в сенсоре подобно обработке визуальной информации в сетчатке глаза [16-18]. Это позволяет существенно улучшить энергоэффективность и скорость обработки визуальной информации и создать компактное автономное нейроморфное зрение подобное биологическому.

Биологическое детектирование и обработка оптической информации

Детектирование и предобработка оптической информации в системе биологического зрения происходит в сетчатке глаза, которая фоточувствительна и может детектировать

видимый свет, переводя оптические сигналы в электрические, и предварительно обрабатывать перед передачей визуальных сигналов в зрительную кору головного мозга (Рис. 11). Сетчатка состоит из ганглиозных, биполярных клеток, колбочек, палочек, фоторецепторов (Рис. 11), которые формируют сигналы для классификации и распознавания изображений. Важная особенность биологической сетчатки — это биполярный фотоотклик биполярных клеток (Рис. 12). Деполяризация клеток светом приводит к изменению знака фотоотклика. Это позволяет контролировать фоточувствительность сетчатки для эффективного распознавания предметов.

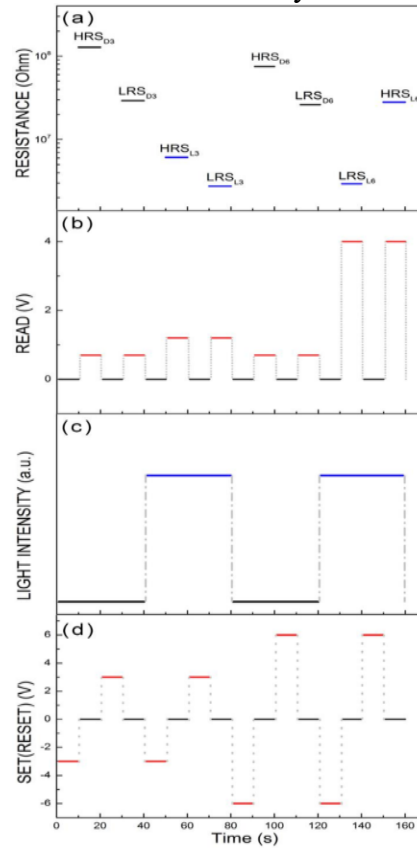


Рис. 10. Диаграммы электрического и оптического контроля мемристивных состояний MoS_2 фотомемристора, сформированных при разных напряжениях в темноте или при возбуждении белым светом. (а) Высоко- и низкоомные состояния, полученные с помощью операций SET/RESET при $-3 \text{ В}/+3 \text{ В}$ и $-6 \text{ В}/+6 \text{ В}$ в темноте (HRSD_3 , LRSD_3 и HRSD_6 , LRSD_6) и при белом свете (HRSL_3 , LRSL_3 , HRSL_6 и LRSL_6). (б) Диаграмма импульсов напряжения считывания. Считывание состояний при $0,7 \text{ В}$ (HRSD_3 , LRSD_3 , HRSD_6 и LRSD_6), $1,2 \text{ В}$ (HRSL_3 и LRSL_3) и 4 В (LRSL_6 и HRSL_6) в темноте (D) или при возбуждении светом (L). (с) Диаграмма возбуждения импульсами белого света. SET/RESET, и операция READ выполняются без импульсов света (черные линии) (HRSD_3 , LRSD_3 , HRSD_6 и LRSD_6) и с импульсами света (синие линии) (HRSL_3 , LRSL_3 , HRSL_6 и LRSL_6). Мемристор, поляризованный при 3 В , демонстрирует четыре состояния, которые считываются как HRSD_3 , LRSD_3 , HRSL_3 и LRSL_3 , в то время как мемристор, поляризованный при 6 В , демонстрирует четыре состояния HRSD_6 , LRSD_6 , HRSL_6 и LRSL_6 , которые можно считать в темноте или при белом свете.

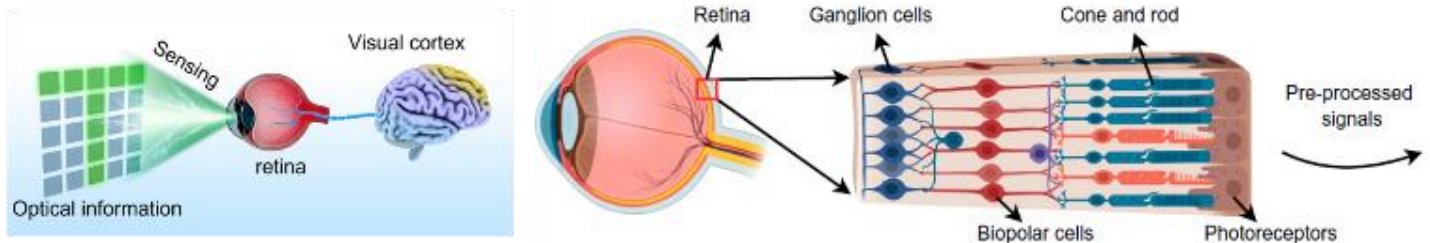


Рис. 11. Детектирование и обработка оптической информации в сетчатке глаза и зрительной коре.

Структуры на основе низкоразмерных кристаллов, чувствительные от УФ до ИК излучения

Наноструктуры на основе MoS_2 /GO поглощают свет в широком спектральном диапазоне от УФ до

ИК (Рис. 13). Эффекты квантования в таких структурах зависят от степени восстановления GO и размера квантовых точек (КТ) из графена и MoS_2 [19], что приводит к изменению поглощения света от 280 до 973 нм.

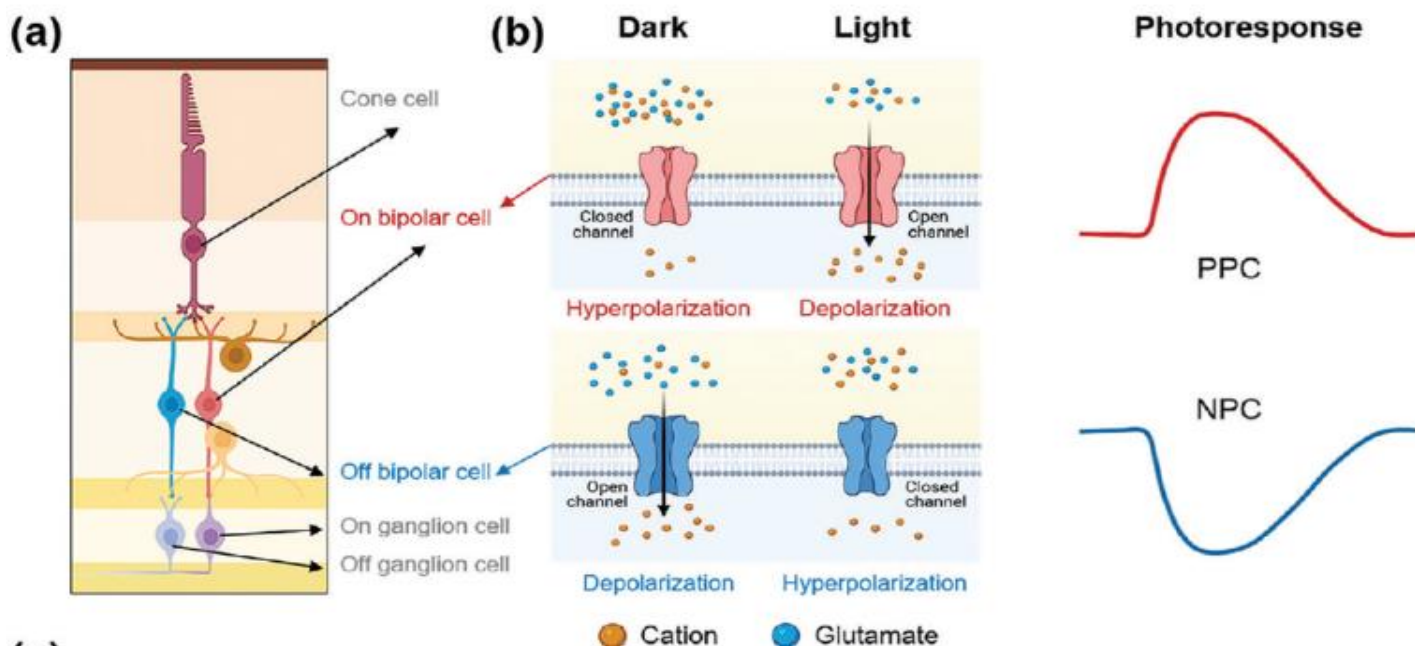


Рис. 12. Гиперполяризация и деполяризация биполярных клеток в темноте и на свету, приводящие к биполярному фотоотклику.

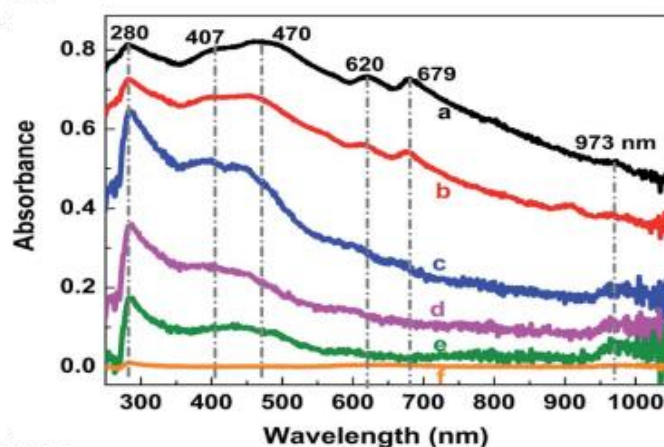
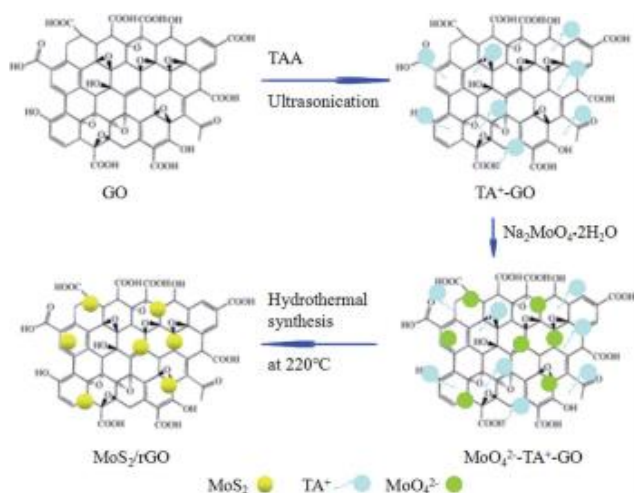


Рис. 13. Формирование самоорганизующихся структур MoS_2 (1,3 эВ)/GO (6-0 эВ) при восстановлении GO. Спектры поглощения MoS_2/rGO , полученные при разных условиях центрифугирования: а-3500 об/мин, б-5000 об/мин, в-6500 об/мин, г-8000 об/мин, д-9500 об/мин, е-11 000 об/мин.

Функционализация двухслойного графена плазменной обработкой приводит к формированию КТ с поглощением и

люминесценцией 390, 475 и 610–620 нм [20] (Рис. 14). Использование квантовых точек SnS_2 размером от 6 до 2,5 нм позволяет расширить

область поглощения от 2,2 до 3,5 эВ (Рис. 15) и изготовить широкополосные фотосенсоры на основе гетероструктуры графен/ Sn_xS_y с высокой чувствительностью 35 АВт^{-1} и высокой обнаружительной способностью $3,4 \times 10^{11} \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ [21,22].

Уникальность 2D кристаллов и слоевых КТ состоит в отсутствии оборванных связей на

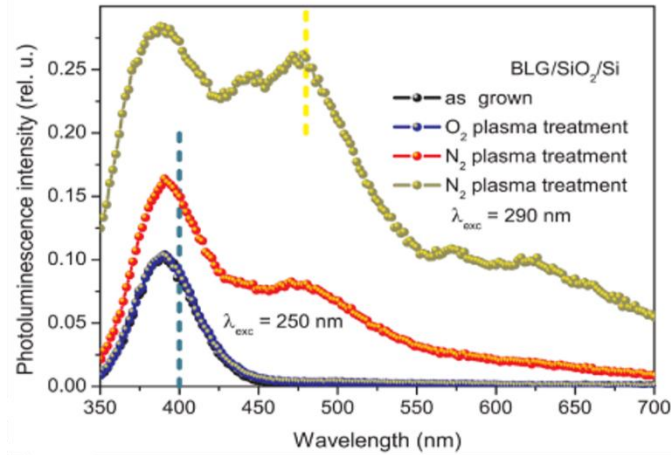


Рис. 14. Спектры фотолюминесценции двух слоев графена, перенесенных на подложку SiO_2/Si и обработанных в плазме азота и кислорода. Спектры получены при возбуждении структуры светом с $\lambda_{\text{возб}} = 250 \text{ нм}$ или 290 нм .

поверхности, что позволяет совмещать их с хорошо разработанной кремневой КМОП

технологией. На Рис. 16 показана матрица широкополосного датчика изображения, продемонстрированная группой из института науки и технологий, Барселона [23] на основе графена встроенного в КМОП технологию без дефектного интерфейса. При росте оптических $\text{A}_{\text{II}}\text{B}_{\text{VI}}$ и $\text{A}_{\text{III}}\text{B}_{\text{V}}$ 3D пленок на кремнии, как известно, образуется большая концентрация рекомбинационных дефектов из-за разных параметров решеток, которые не позволяют получить пленки необходимого качества. Интеграция КМОП-интегральных схем (ИС) с графеном и КТ PbS позволяет создать широкополосный датчик изображения с высоким разрешением и чувствительностью в УФ-, видимом и ИК-диапазонах от 300 нм до 2 мкм [23].

Двумерные кристаллы помимо поглощения в широком диапазоне длин волн демонстрируют сверхбыстрые фотоиндуцированные фазовые переходы. Например, обратимый фото наведённый структурный переход в MoS_2 из полупроводниковой фазы 2H в металлическую 1T (Рис. 17) происходит в диапазоне фемтосекунд [24].

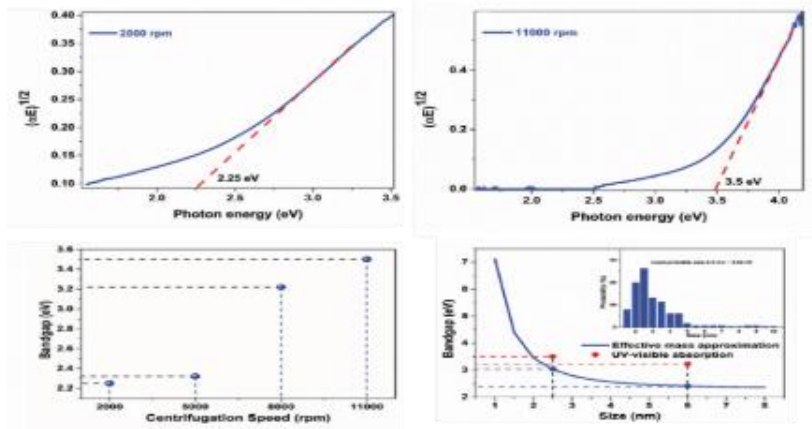


Рис. 15. Спектры поглощения квантовых точек SnS_2 , полученные методом LPE и схематичное изображение широкополосного фотосенсора на основе гетероструктуры графен/ Sn_xS_y

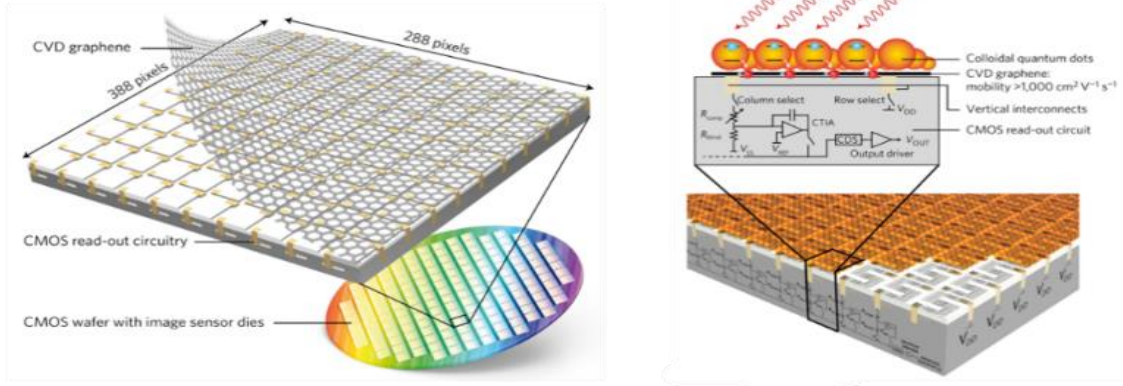


Рис. 16. Матрица широкополосного сенсора изображения (288 x 388) на основе графена с коллоидными КТ, встроенными в КМОП-ИС считывания.

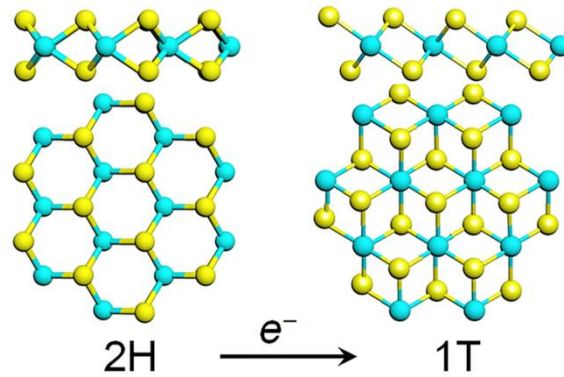


Рис. 17. Структурный переход в MoS_2 , наведенный зарядом, из полупроводниковой фазы 2H в металлическую 1T.

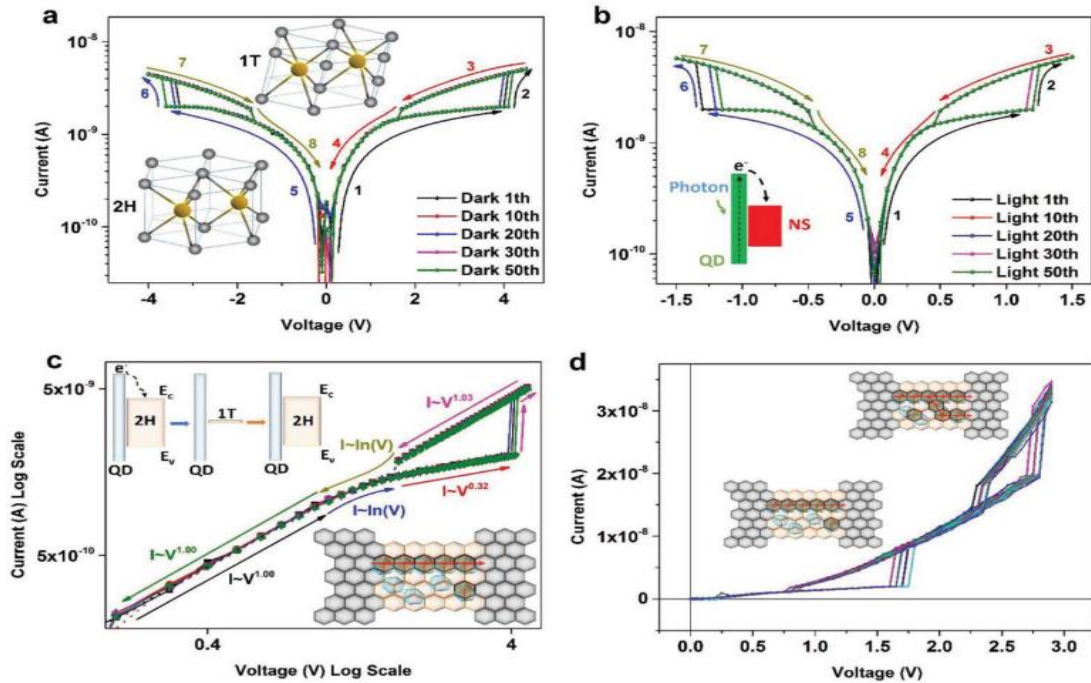


Рис. 18. Мемристивные состояния в MoS_2/KT наноструктуре, сформированные при разных напряжениях смещения структуры в темноте (a) и на свету (b,c,d). Фотомемристивные состояния, связанные с локальным формированием 2H и 1T фаз, при локальном возбуждении наноструктуры лазером с длиной волны 532 нм при напряжениях смещения 1.7, 2.7 и 4 В (c,d).

Контроль структурных переходов в MoS_2 дает возможность создать интеллектуальные фотомемристорные сенсоры для сверхбыстрой обработки визуальной информации.

На Рис. 18 показаны фотомемристивные состояния, связанные с 2H и 1T фазами, формирующимися при возбуждении $\text{MoS}_2/\text{КТ}$ наноструктуры лазером с длиной волны 532 нм при разных напряжениях смещения. Структурный переход в $\text{MoS}_2/\text{КТ}$ наноструктуре контролировался возбуждением КТ и зависел от поглощения и пространственного распределения КТ. Распределение КТ контролировало каналы переключения фоторезистивных состояний светом, длина волны которого позволяла возбуждать носители заряда и осуществлять фотонаведенный структурный переход [25].

Новый подход к обработке визуальной информации был продемонстрирован группой исследователей из Ханчжоуского института перспективных исследований, Шанхайского института технической физики, Института интеллектуальных машин и Института проблем технологии микроэлектроники [26]. Была показана возможность формирования и контроля энергонезависимых состояний фотопроводимости в низкоразмерных структурах при возбуждении их светом в электрическом поле, приводящем к изменению мем-фотопроводимости и мем-фоточувствительности. Энергонезависимые состояния фотоотклика в фотомемристоре $\text{G}/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x/\text{G}$ позволяли считывать их оптически при нулевом напряжении смещения.

Структуры фотомемристоров Графен/ $\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ /Графен (G/M/G) были изготовлены с использованием нанокристаллов MoS_2 (NC) и графена, выращенного методом CVD, в качестве электродов. NC MoS_2 были получены методом жидкофазного расслоения (LPE). NC MoS_2 окислялись во время осаждения, образуя тонкую пленку $\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ p-типа в контакте с графеновыми электродами с асимметричной геометрией (соотношение площадей ($\text{SC}_2:\text{SC}_1$) $\approx 3,5$, толщина $\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x \approx 200$ нм) [26].

На Рис. 19 показана G/M/G наноструктура с асимметричными электродами и характеристики переключения многоуровневого фотоотклика при разных напряжениях смещения. Когда

двухтерминальный асимметричный фотомемристор G/M/G освещался белым светом ($\sim 56 \text{ мВт см}^{-2}$), наблюдался фотогальванический эффект с отношением фототока (I_L) к темновому току (I_D) $\sim 10^3$ [26]. На Рис. 19 (внизу слева на право) показаны I-V характеристики переключения фототока с 0,29 до 1,23 мкА при напряжении SET 1,60 В во время развертки напряжения от 0 до 2В.

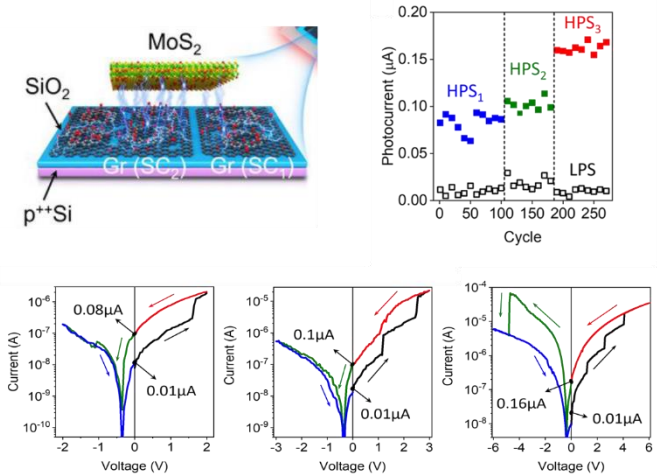


Рис. 19. $\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ наноструктура с асимметричными электродами из графена и характеристики переключения многоуровневого фотоотклика (HPS₁, HPS₂, HPS₃ и LPS). Оптическое считывание энергонезависимых состояний фотоотклика 0,08, 0,1, 0,16 и 0,01В при нулевом напряжении смещения на длине волны 530 нм.

Когда напряжение смещения изменяется от 2В до –2В, устройство переключается из состояния высокого фотоответа (HPS) в состояние низкого фотоответа (LPS) при напряжении RESET –1,05 В, демонстрируя энергонезависимую память фотоотклика. Интересно, что устройство генерирует фототок без напряжения смещения, что обусловлено асимметричными контактами G/M/G, и позволяет считывать различные значения LPS (0,01 мкА) и HPS₁ (0,08 мкА) без напряжения смещения. Увеличение напряжения до 2,45 В и 4,05 В приводит к последовательному переключению HPS при смещении 0 В до 0,1 мкА и 0,16 мкА соответственно. На Рис. 19 (вверху справа) показаны данные считывания фототока при напряжении смещения 0 В с отношением включения/выключения фототока около 10 для сотен циклов.

Для исследования механизма переключения энергонезависимых состояний фотоотклика были исследованы оптоэлектронные свойства

фотомемристора, спектры комбинационного На Рис. 20a показаны вольтамперные рассеяния фотомемристорной наноструктуры и характеристики наноструктуры. проведено TCAD моделирование.

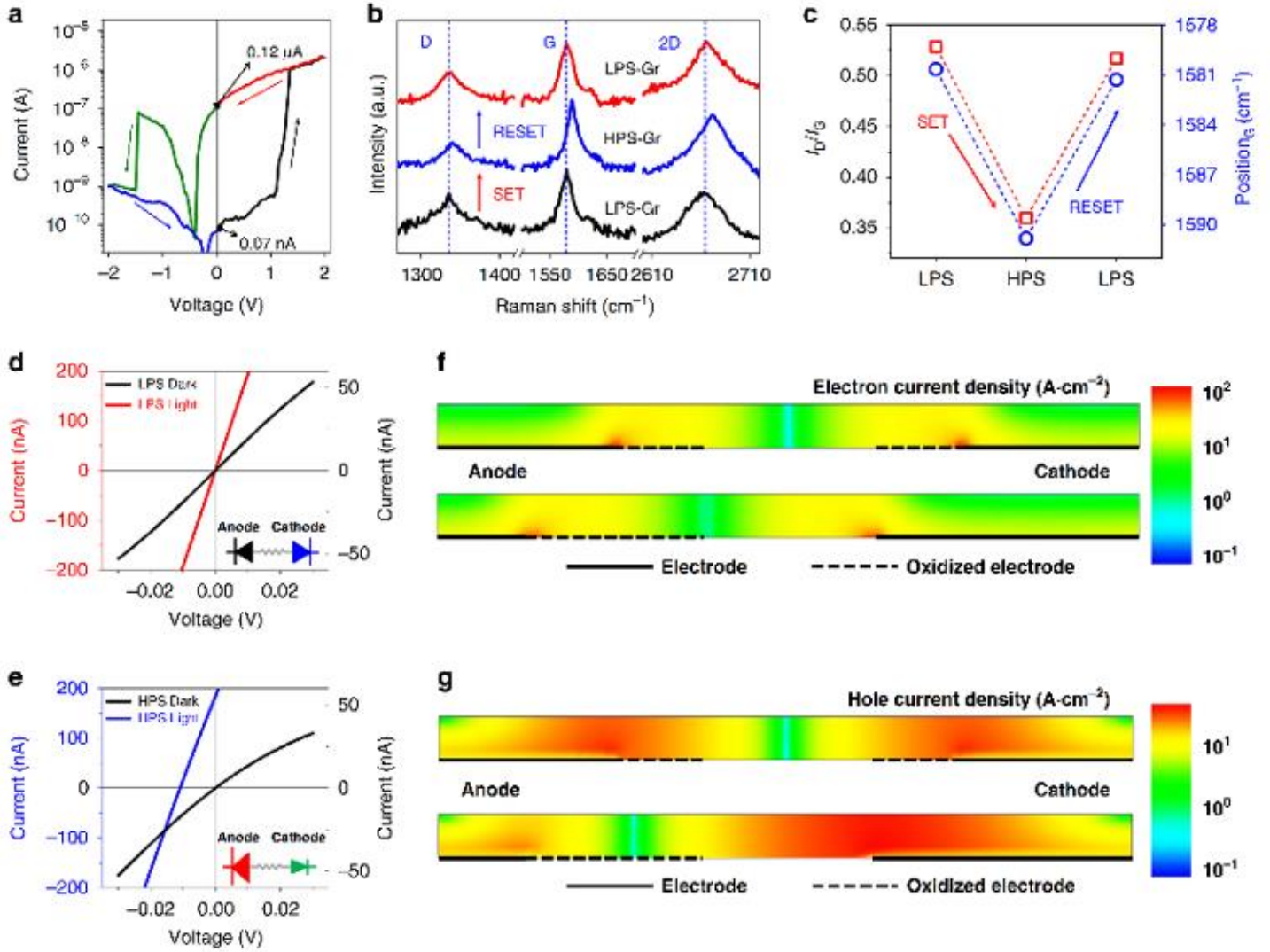


Рис. 20. Характеристики переключения состояний фотоотклика при изменении напряжения смещения и считывание LPS и HPS при нулевом напряжении (а), спектры комбинационного рассеяния (КР) при переключении между состояниями HPS и LPS (b) и изменения I_D/I_G КР полос и сдвигов G-моды и состояний фотоотклика (с). TCAD моделирование темнового и фототока устройства G/M/G для LPS (d) и HPS (e). Вставки в (d) и (e) демонстрируют качественную модель устройства для LPS и HPS соответственно. Распределение плотности электронного тока в LPS (вверху) и HPS (внизу) при освещении (f). Распределение плотности дырочного тока в LPS (вверху) и HPS (внизу) при освещении (g).

Фототок переключается с LPS на HPS при напряжении SET $\sim 1,2$ В, а с HPS на LPS при напряжении RESET ~ -1 В. На Рис. 20b показаны моды рамановского рассеяния катода, измеренные, когда устройство переключалось с LPS на HPS. Отношение I_D/I_G уменьшалось с 0,51 до 0,33, а положения полос G и 2D демонстрируют красные смещения 9 см^{-1} и 7 см^{-1} , соответственно. Такое изменение в рамановских модах указывает на восстановление графена [27,28]. После операции

RESET отношение I_D/I_G увеличилось до 0,49. В этом случае наблюдалось синее смещение полос G и 2D, демонстрирующее процесс окисления [27-29].

Увеличение (уменьшение) фототока фотомемристорной наноструктуры сопровождается восстановлением (окислением) катодных электродов, что свидетельствует о том, что фоточувствительное переключение

коррелирует с обратимыми окислительно-восстановительными реакциями на интерфейсе $\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x/\text{G}$. Такой обратимый окислительно-восстановительный процесс при данном потенциале наблюдается только при освещении. Резистивное переключение в темноте требует более высокого напряжения ~ 12 В [26]. Обратимое окисление (восстановление) графена (оксида графена) приводит к обратимому уменьшению (увеличению) подвижности носителей заряда более чем на порядок величины [27]. Кроме того, проводимость CVD-графена уменьшается, когда степень окисления увеличивается. Это изменяет эффективность сбора фотовозбуждённых носителей на катоде и аноде.

Взаимосвязь между состояниями фотоответа и окислительно-восстановительным процессом на графеновых электродах, была исследована TCAD моделированием (Рис. 20 d–g). G/M/G наноструктура представлена в виде двух включенных навстречу друг другу диодов Шоттки, соединенных последовательно (Рис. 20 d и e). При увеличении (уменьшении) эффективного размера контакта, сопротивление соответствующего диода уменьшается (увеличивается) [22]. Темновой ток симметричен с симметричной степенью окисления катода и анода (Рис. 20 d, черная кривая). Когда

напряжение смещения равно 0, плотность тока анода и катода имеет одинаковые значения с противоположной полярностью (верхняя карта распределения плотности тока на Рис. 20 f и g) при освещении. Таким образом, фототок равен 0 (Рис. 20 d, красная кривая), что соответствует LPS наноструктуры G/M/G. После приложения положительного напряжения смещения кислородные вакансии мигрируют из $\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ к катоду и с анода в $\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$, что приводит к восстановлению и окислению катода и анода, соответственно. При освещении смоделированная TCAD плотность тока электронов/дырок анода и катода демонстрирует разные значения с противоположной полярностью (Рис. 20 f и g, нижние карты плотности тока). При этом значение фототока равно ~ 170 нА (Рис. 20 e, синяя кривая), что соответствует HPS G/M/G структуры.

Полученные экспериментальные результаты и проведенное моделирование показывают, что процессы окисления-восстановления электродов из графена контролируют состояния фотоотклика в фотомемристормом сенсоре.

На Рис. 21 показаны 7 различных состояний фотоответа массива фотомемристоров.

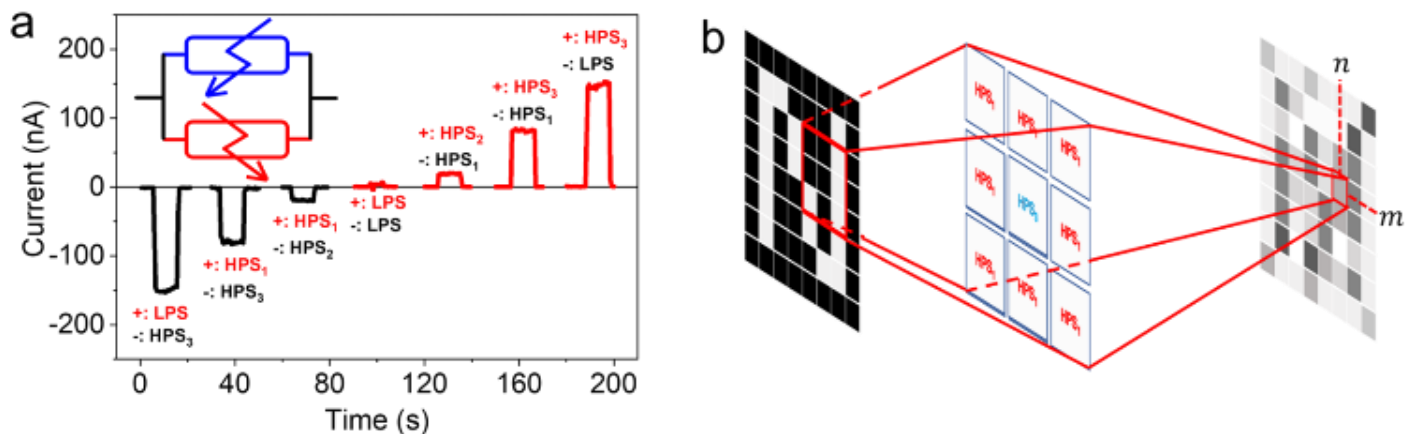


Рис. 21. (а) Фототок в фотомемристормом сенсоре для различных состояний фотоотклика (HPS₁, HPS₂, HPS₃ и LPS) для разных наборов фотомемристоров. Вставка: Схема включения фотомемристоров с противоположной полярностью. (б) Матрица 3 x 3 фотомемристоров со встроенной архитектурой «считывание-память-вычисление».

Используя эти 7 состояний, можно эмулировать два типа функций нейроморфного зрения: предварительную обработку изображений и

классификатор. Имитация функции предварительной обработки нейроморфного зрения сетчатки человека может ускорить

последующие задачи восприятия и улучшить скорость распознавания изображений. Фотомемристоры G/M/G объединены в массив 3×3 , который позволяет моделировать биологическое рецептивное поле (RF) сетчатки человека, контролируемое различными состояниями фототовета. Суммирование всех фототоков от каждого фотомемристора эмулируемых массивов выполняет операцию умножения матрицы на вектор:

$$I_{m,n} = \sum_{i,j}^{3,3} R_{i,j} \times P_{i,j}^{m,n}$$

где $R_{i,j}$ - матрица фотоотклика для различных типов ядер, $P_{i,j}^{m,n}$ - вектор оптического сигнала входного изображения, $I_{m,n}$ - выходной вектор, представляющий динамический ток входного сигнала.

Принцип работы классификатора на основе фотомемристорного сенсора со встроенной оптоэлектронной нейронной сетью показан на Рис. 22.

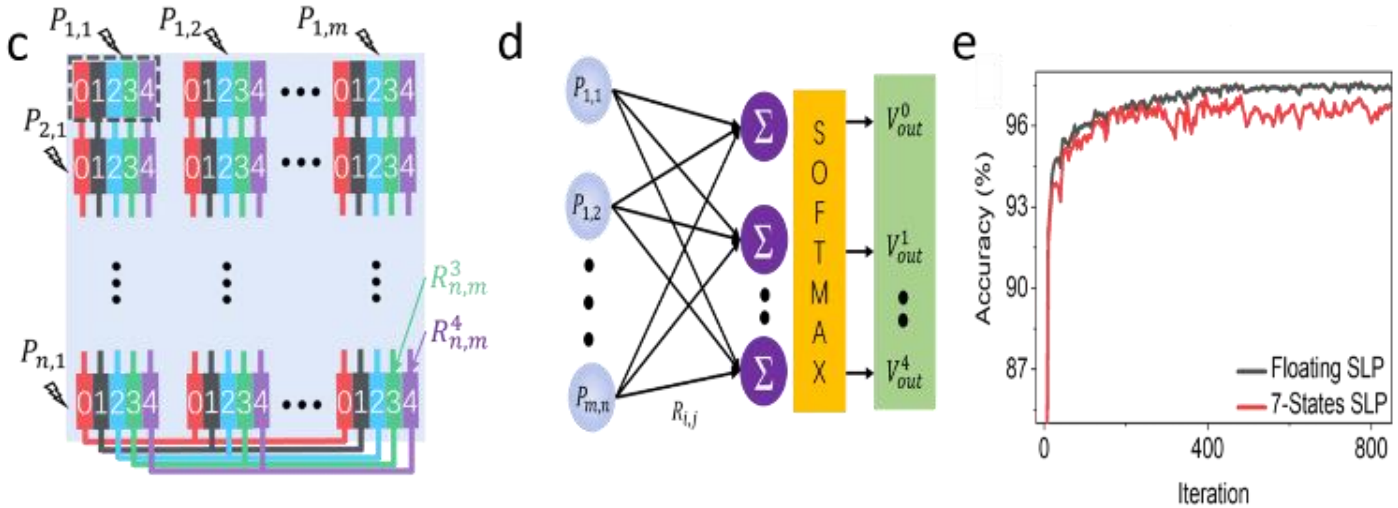


Рис. 22. Схематическая иллюстрация массива фотомемристоров SLP для эмуляции классификатора. Все фотомемристоры одного класса (цвета) соединены параллельно для получения выходного тока для функции активации (с). Схема архитектуры нейронной сети SLP (d). Точность классификатора SLP во время обучения с весом с плавающей запятой и 7-уровневым состоянием фототовета (e).

Каждая ячейка фотоприемных матриц состоит из 5 наборов фотомемристоров, соответствующих 5 классам ($k = 0, 1, 2, 3, 4$). Суммирование всех фототоков от ячейки с тем же классом из эмулируемых массивов выполняет операцию матрично-векторного умножения:

$$I_k = \sum_{i,j}^{m,n} R_{i,j}^k \times P_{i,j}$$

где $R_{k,i,j}$ — матрица фоточувствительности для класса k , $P_{i,j}$ — вектор оптического сигнала входного изображения, как показано на Рис. 22, выходной ток I_k — вход для функции активации. Сеть состоит из однослойного персептрона (SLP) вместе с функциями SoftMax. SLP представляет собой контролируемый алгоритм обучения, который классифицирует входные изображения на 5 классов. Входной слой такого SLP захватывает

изображение размером 28×28 пикселей чисел 0, 1, 2, 3, 4 из набора данных MNIST, а полностью связанный (FC) слой состоит из 768×10 нейронов. SLP обучается в автономном режиме с использованием 30596 изображений обучающего набора с размером пакета 64 и 4000 итераций, обеспечивая окончательную вероятность вывода, которая классифицирует входные изображения в тестовом наборе (5139 изображений) на 5 классов с точностью 97,66%. Веса в FC слое дискретизируются для учета 7 состояний фототовета. После дискретизации точность составляет около 96,44%, что на 1,22% ниже, чем у исходного SLP. Энергонезависимая матрица фоточувствительности на основе двухтерминальных фотомемристоров может использоваться для одновременного восприятия и классификации входных изображений с высокой

точностью. Это указывает на перспективность энергонезависимых внутрисенсорных вычислений с использованием фотомемристоров.

Заключение

Фотомемристорные сенсоры на основе низкоразмерных кристаллов семейства графена, для которых характерно отсутствие на их поверхности оборванных связей, представляют собой новый класс биоподобных оптоэлектронных устройств совместимых с КМОП технологией. Фотомемристивные состояния в структурах на основе графена, дисульфида молибдена и квантовых точек могут контролироваться электрически и оптически в широком УФ-ИК диапазоне, что позволяет изготавливать на их основе широкополосные интеллектуальные фотодетекторы. Фотомемристивное устройство со встроенной нейронной сетью позволяет энергоэффективно детектировать, запоминать и обрабатывать визуальную информацию подобно биологическому зрению, что можно использовать для разработки автономных систем искусственного нейроморфного зрения.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-49-00159. Работы на экспериментальных установках Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук проводились и поддерживались в рамках государственного задания № 075-00295-25-00.

Ссылки

1. Tesla's BREAKTHROUGH DOJO Supercomputer Hardware Explained.
<https://www.youtube.com/watch?v=pPHX7e1BxSM> (accessed on 1 September 2021).
2. Unified Energy System of Russia: Interim Results. November 2021. Available online: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2021/ups_review_1121.pdf (accessed on 1 December 2021).
3. Chua L., IEEE Transactions on circuit theory 18 (5), 507 (1971) doi: 10.1109/TCT.1971.1083337
4. G.N. Panin et al. Resistance Switching Induced by an Electric Field in ZnO:Li, Fe Nanowires_AIP Proc. V. 893, p. 743, April 10 (2007).
5. Strukov D., et al. Nature 453, 80 (2008). <https://doi.org/10.1038/nature06932>
6. G.N. Panin et al. Int. Symp. Graphene Devices, Sendai, Japan (2010); Jap. J. App. Phys. 50, 070110 (2011)
7. Chua L. O., Nat Electron 1, 322 (2018). doi: 10.1038/s41928-018-0074-4
8. G.N. Panin et al MRS Proc. Vol. 957, 406 (2006); DOI: 10.1557/PROC-0957-K04-06
9. O.O. Kapitanova et al. Direct patterning of reduced graphene oxide/graphene oxide memristive heterostructures by electron-beam irradiation, J. Mater. Sci. Technol., V38, 237 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.07.042>
10. Emelin E.V. et al. Resistive Switching in Bigrphene/Diamane Nanostructures Formed on a La₃Ga₅SiO₁₄ Substrate Using Electron Beam Irradiation. Nanomaterials, 13(22), 2978 (2023) <https://doi.org/10.3390/nano13222978>
11. Brett R. Goldsmith, John G. Coroneus, Vaikunth R. Khalap, et al, Conductance-Controlled Point Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes, Science, V. 315, Issue 5808, pp. 77-81 (2007) DOI: 10.1126/science.1135303
12. L.A. Chernozatonskii, P.B. Sorokin, A.G. Kvashnin, D.G. Kvashnin, JETP Letters, 2009, Vol. 90, No. 2, pp. 134–138.
13. Zengguang Cheng et al., On-chip photonic synapse. Sci. Adv. 3, e1700160 (2017). DOI:10.1126/sciadv.1700160
14. Seo, S., et al. Artificial optic-neural synapse for colored and color-mixed pattern recognition. Nat Commun 9, 5106 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07572-5>
15. Wang, W., Panin, G., Fu, X. et al. MoS₂ memristor with photoresistive switching. Sci Rep 6, 31224 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep31224>
16. Panin, G.N., 2022. Low-dimensional layered light-sensitive memristive structures for energy-efficient

- machine vision. *Electronics*, 11(4), p.619.
<https://doi.org/10.3390/electronics11040619>
17. Gennady N. Panin, Optoelectronic dynamic memristor systems based on two-dimensional crystals, *Chaos, Solitons and Fractals*, V. 142, 110523 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110523>
18. G.N. Panin, O.O. Kapitanova, Photomemristor Structures Based on 2D Crystals for Biocompatible Information Sensor Systems, *Nanobiotechnology Reports*, 2021, Vol. 16, No. 6, pp. 706–721.
<https://doi.org/10.1134/S2635167621060173>
19. Wang, W.; Kapitanova, O.O.; Ilanchezhian, P.; Xi, S.; Panin, G.N.; Fu, D.; Kang, T.W. Self-assembled MoS₂/rGO nanocomposites with tunable UV-IR absorption. *RSC Adv.* 2018, 8, 2410–2417.
20. N. N. Kovaleva et al, *2D Materials* 045021 (2019) DOI 10.1088/2053-1583/ab2ee9
21. Xiao Fu et al, *Nanoscale*, 9, 1820 (2017)
<https://doi.org/10.1039/C6NR09022B>
22. Xiao Fu, et al, *Mater. Horiz.*, 2022,9, 3095–3101.
<https://doi.org/10.1039/D2MH00872F>
23. Goossens, S., Navickaite, G., Monasterio, C. et al. Broadband image sensor array based on graphene–CMOS integration. *Nature Photon* 11, 366–371 (2017). <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.75>
24. Yinsheng Guo, Dezheng Sun, Bin Ouyang, Archana Raja, Jun Song, Tony F. Heinz, Louis E. Brus, Probing the Dynamics of the Metallic-to-Semiconducting Structural Phase Transformation in MoS₂ Crystals, *Nano Lett.* 2015, 15, 5081–5088, DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b01196
25. Fu X, et. al. Molybdenum Disulfide Nanosheet/Quantum Dot Dynamic Memristive Structure Driven by Photoinduced Phase Transition. *Small*. 2019 Nov;15(45):e1903809. doi: 10.1002/sml.201903809.
26. Fu, X., Li, T., Cai, B. et al. Graphene/MoS_{2-x}O_x/graphene photomemristor with tunable non-volatile responsivities for neuromorphic vision processing. *Light Sci Appl* 12, 39 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01079-5>
27. Mulyana, Y. et al. Reversible oxidation of graphene through ultraviolet/ozone treatment and its nonthermal reduction through ultraviolet irradiation. *J. Phys. Chem. C* 118, 27372–27381 (2014).
28. Kwon, S. et al. Reversible oxidation states of single layer graphene tuned by electrostatic potential. *Surf. Sci.* 612, 37–41 (2013).
29. Kapitanova, O. O. et al. Formation of self-assembled nanoscale graphene/graphene oxide photomemristive heterojunctions using photocatalytic oxidation. *Nanotechnology* 28, 204005 (2017).