

УДК 621.382

ФОТОМЕМРИСТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ 2D-КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ БИОСОВМЕСТИМЫХ ИНФОРМАЦИОННО-СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

© 2021 г. Г. Н. Панин^{1,*}, О. О. Капитанова^{2,3}

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*E-mail: panin@iptm.ru

Поступила в редакцию 01.07.2021 г.

После доработки 26.07.2021 г.

Принята к публикации 26.07.2021 г.

Новые биосовместимые двумерные (2D) материалы, такие как графен, оксид графена и другие, демонстрируют огромный потенциал в создании инновационных широкополосных информационных сенсорных систем для мониторинга и обработки визуальной информации в реальном времени. Синапсоподобные мемристорные гетероструктуры рассматриваются как новый тип электронных переключателей с чрезвычайно низкими энергопотреблением и занимаемой площадью, которые могут быть использованы для преодоления ограничений современной цифровой электроники. В обзоре представлены результаты исследования фотомемристорных структур на основе 2D-материалов для эффективной обработки данных в нейронных сетях. Фотокаталитическое окисление графена позволяет создавать мемристорные элементы с резистивным переключением высокой плотности. Особое внимание уделено концепции формирования самоорганизующихся фотомемристорных наноструктур и биосовместимых сенсорных элементов для получения и обработки визуальной информации. Фотомемристорные 2D-структуры демонстрируют многоуровневые состояния, которые можно контролировать в широком диапазоне длин волн и использовать в нейрогибридных сенсорных информационных системах для регистрации нейронных сигналов от зрительной коры, а также в системах искусственного зрения для распознавания образов и обработки изображений.

DOI: 10.1134/S1992722321060170

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение. Современная обработка информации

1. Мемристивные системы

1.1. Мемристорные электронные устройства

1.2. Двумерные кристаллы

1.3. Мемристоры на основе 2D-кристаллов

2. Фотомемристорные системы

2.1. Фотомемристоры на основе 2D-кристаллов MoS₂

3. Датчики изображения и фотонные запоминающие устройства

3.1. Матрицы датчиков изображения на основе графен–MoS₂

3.2. Фотонный чип с фотонными синапсами

Выводы и перспективные направления исследований

ВВЕДЕНИЕ. СОВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Необходимость обработки больших неструктурированных объемов информации требует от современной цифровой электроники более эффективных природоподобных информационных технологий, использующих нейроморфную архитектуру и нейронные сети для быстрых и энергоэффективных вычислений и хранения информации. Цифровые компьютеры на основе кремниевых сверхбольших интегральных схем, разработанные для решения задач с фиксированными данными, для распознавания образов, звука, движения без использования искусственных нейронных сетей малоэффективны. Физическое разделение памяти и процессора в цифровом компьютере (рис. 1) приводит к ограничению производительности при операциях с большим объемом информации и к огромному энергопотреблению. Например, современный суперкомпьютер Fujitsu “К Computer” (10 петафлопс (10¹⁶ миллиардов операций в секунду), с оперативным запоминающим устрой-

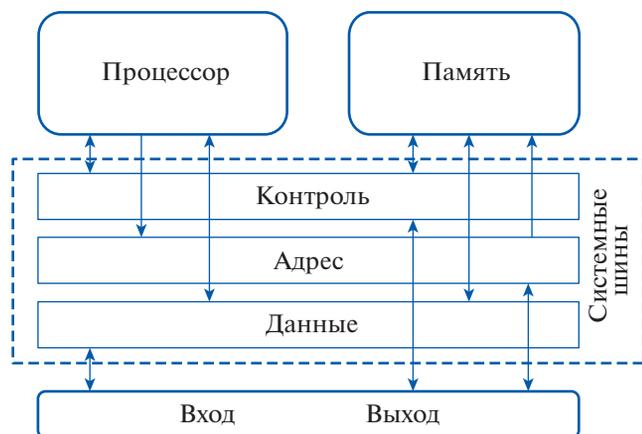


Рис. 1. Архитектура фон Неймана цифрового компьютера.

ством в 1 петабайт) при моделировании работы 1% нейронов мозга человека потребляет ~10 МВт мощности. При этом моделирование одной секунды работы мозга требует ~40 мин. При моделировании работы коры головного мозга мыши с 10^4 нейронами и 10^{10} синапсами суперкомпьютер “Blue Gene” с 10^9 транзисторов (~1 ноутбук на нейрон) потребляет около 0.1 МВт. Увеличение производительности современных компьютеров, как известно, ограничивается пределом масштабирования кремниевой комплементарной металл–оксид–полупроводник (КМОП) технологии. Уменьшение размеров транзисторов приводит к нагреву микросхем и колоссальному энергопотреблению при обработке больших данных. В 2020 г. компания Samsung выпустила 3 нм чип, который использует архитектуру транзисторов Gate-all-around (GAA) [1], вплотную приблизившись к пределу технологии малой мощности [2], что указывает на актуальность разработки новых материалов и новых подходов к хранению и обработке больших объемов информации.

Интеллектуальная обработка цифровой информации с использованием искусственных нейронных сетей и продвинутых алгоритмов мозга подобных массивных параллельных вычислений позволяет существенно повысить эффективность и скорость обработки неструктурированных данных [3]. В последние годы различные типы нейронных сетей, таких как сверточные [4], рекуррентные [5, 6], осцилляторные [7–9], а также резервуарные вычисления [10–12] демонстрируют быстрое развитие и перспективность для эффективного решения задач машинного зрения, распознавания речи и движения объектов. Для аппаратной реализации и обеспечения высокой эффективности резервуарных вычислительных систем были исследованы различные новые материалы и устройства, такие как спинтронные и

мемристивные осцилляторы [7, 9, 13], фотонные модули [14–16], мемристоры [10, 17–19]. Значительный прогресс был достигнут в реализации искусственных нейронных сетей на основе мемристоров за счет использования их аналоговых резистивных коммутационных свойств [20–25]. В настоящем обзоре основное внимание уделено рассмотрению оптоэлектронных мемристивных устройств на основе двумерных кристаллов для нейроморфных сенсорных систем искусственного зрения.

1. МЕМРИСТИВНЫЕ СИСТЕМЫ

1.1. Мемристивные электронные устройства

Мемристивные электронные устройства подобны биологическим синапсам в нейронных сетях. Мемристоры представляют собой новый тип электронных логических переключателей и памяти с чрезвычайно низким энергопотреблением и занимаемой площадью [26]. Эти новые электронные компоненты могут решить проблему физических и технологических ограничений современной КМОП-технологии и стать элементной базой для эффективной обработки больших данных и для создания искусственного интеллекта и искусственного зрения.

Мемристор как нелинейный резистивный элемент был введен Леоном Чуа в 1971 г. для описания недостающего четвертого базового элемента электрической схемы [27]. Мемристор наряду с другими известными элементами электрической схемы, такими как конденсатор, резистор и индуктор, мог описывать нелинейные эффекты в твердотельной электронике, которые были уже хорошо известны. В 1922 г. Олег Лосев наблюдал новое явление отрицательного дифференциального сопротивления в двухэлектродном точечном устройстве – *crystal diode* [28, 29] которое затем использовалось для генерации и обнаружения сигнала в радиовещании. Кристадин Лосева позволял работать на частотах до 100 МГц, в то время недостижимых и непонятных для применения. В 1957 г. Лео Эсаки независимо продемонстрировал аналогичное нелинейное устройство – туннельный диод, а в 1973 г. получил за открытие этого эффекта Нобелевскую премию по физике. В 2007 г. экспериментально продемонстрирован первый мемристор из наностержня ZnO [30]. Переключение сопротивления в электрическом поле в наностержнях ZnO: Fe, Li (рис. 2) было объяснено влиянием примесей Fe, Mn, Li, которые локально могли изменять как электрические свойства, так и образовывать магнитные домены [31, 32] (рис. 2, вставка), что обеспечивало мультиферроидное переключение в этих наноструктурах. Нелинейное двухэлектродное мемристивное устройство на основе пленки TiO₂ было проде-

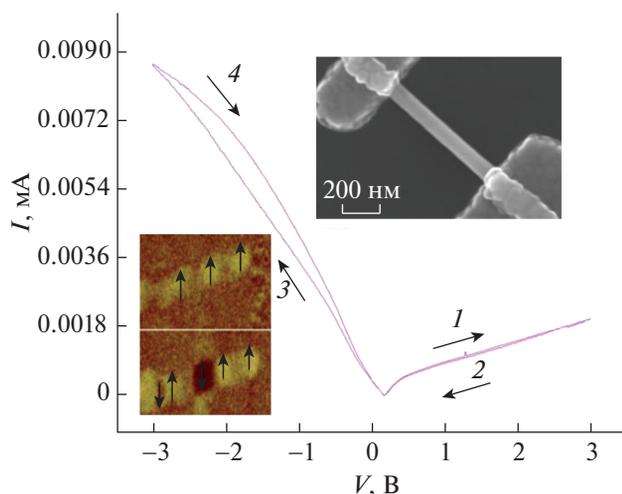


Рис. 2. ВАХ нанопроволоки ZnO: Fe, Li диаметром 70 нм при изменении напряжения от 0 до 3 В и обратно, а также от 0 до –3 В и обратно до 0. На вставках показаны СЭМ-изображения нанопроволоки с алюминиевыми электродами, полученными с помощью электронно-лучевой литографии (вверху справа), и изображения магнитно-силовой микроскопии нанопроволоки ZnO: Mn во внешнем магнитном поле (внизу слева). Другое направление магнитного поля приводит к переключению одиночных магнитных нанодоменов со спином вверх (верхняя часть, яркий контраст) на спин вниз (нижняя часть, темный контраст).

монстрировано в 2008 г. группой из Hewlett Packard [33]. Это устройство состояло из двух наноразмерных областей, легированной и нелегированной, относительное смещение которых управляло включенным и выключенным состояниями. Первая матрица мемристоров была изготовлена на основе TiO_2 на кристалле КМОП в лаборатории Hewlett Packard в 2012 г. Мемристор с двумя платиновыми электродами представлял собой нелинейную динамическую структуру, сопротивление которой зависело от электрического поля и протекания тока. Это нелинейное устройство позволяло формировать энергонезависимые состояния для хранения информации при отключенном питании, демонстрировало возможность получения сверхвысокой плотности записи, низкой энергии переключения, высокой скорости работы, длительного времени хранения и возможность многоуровневой записи с использованием дискретных или непрерывных состояний. Ряд сложных вычислительных задач, например для обработки изображений и распознавания образов, может быть эффективно решен с помощью нелинейного динамического подхода. В частности, интеллектуальный фотодатчик Toshiba с универсальным чипом на основе сверточной нейронной сети способен обрабатывать изображения аналогично человеческому мозгу, что позволяет рассчитывать элементарные задачи распознавания изображе-

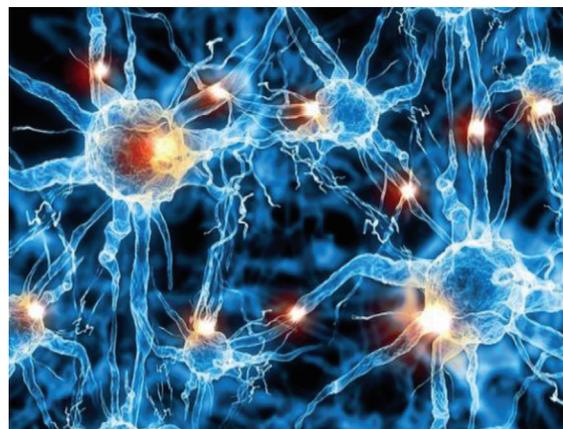


Рис. 3. Нейронная сеть.

ний за наносекунды. Мемристоры, электронные аналоги синапсов в биологических нейронных сетях, могут быть использованы для создания высокопроизводительных интеллектуальных машин и компьютеров с нейроморфной архитектурой, подобной мозгу. Известно, что человеческий мозг, содержащий 10^{11} нейронов и 10^{15} синапсов (рис. 3), обрабатывает аналоговую информацию и потребляет всего около 20 Вт [34, 35]. Вычисления, проводимые в мозге, требуют массивно-параллельных операций с высокой степенью случайной связи нейронов для аналоговой обработки сигналов и состояний памяти, а также хранения измененных состояний памяти в синапсах. Аналоговая обработка информации высокоэффективна для обработки неструктурированных сенсорных данных, таких как изображение, видео, звук, движение и т.д.

Электронные устройства могут иметь архитектуру, аналогичную живой нервной системе коры головного мозга, в которой ~ 0.15 квадриллиона (10^{15}) синапсов или триллион синапсов/ cm^3 ($10^{12}/\text{cm}^3$). Для сравнения: 7 нм чип FinFET Samsung имеет 40 миллиардов переключателей ($4 \times 10^{10}/\text{cm}^2$). В возрасте 20 лет мозг содержит $\sim 150\,000$ – $180\,000$ км нервных волокон, соединяющих все эти нейронные элементы. Каждый нейрон может связываться с любым другим нейроном не более чем шестью связями – “шесть степеней разделения”. При этом около 85 000 нейронов умирают за один день или около одного нейрона в секунду [36]. Понимание механизмов самоорганизации и самовосстановления нейроморфных систем позволило бы создавать искусственные электронные сети, подобные живым нейронным, а в природоподобных компьютерах использовать не только коррекцию ошибок и резервирование элементов, но и создавать самособирающиеся и самовосстанавливающиеся электронные компоненты.

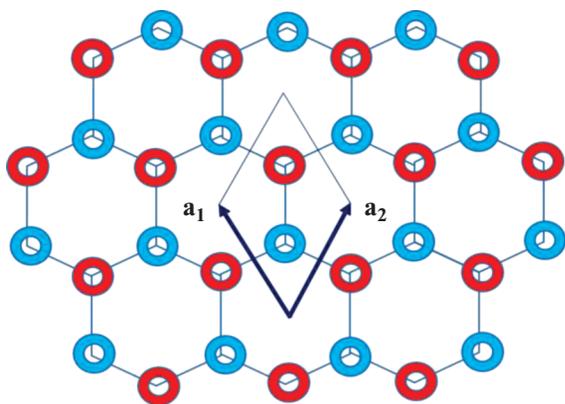


Рис. 4. Гексагональная решетка графена. Элементарная ячейка, определяемая векторами a_1 и a_2 , содержит два атома углерода из эквивалентных подрешеток.

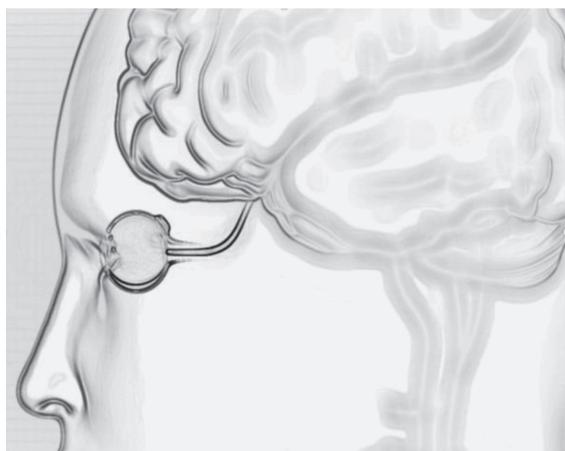


Рис. 5. Протезы сетчатки на основе графена [41].

1.2. Двумерные кристаллы

Уникальные электронные и оптические свойства атомарно тонких двумерных (2D) материалов, таких как графен, оксид графена, дисульфид молибдена и другие, демонстрируют огромный потенциал для создания нано- и биоэлектроники сверхвысокой плотности для инновационных информационных систем. Графен представляет собой кристаллический 2D-слой углерода толщиной в один атом. Элементарная ячейка в гексагональной решетке графена определяется векторами a_1 и a_2 , содержащими два атома из двух эквивалентных подрешеток углерода (рис. 4). Огромный интерес к этому материалу появился в 2004 г. после публикации исследователей из ИПТМ РАН и Манчестерского университета о влиянии электрического поля на атомарно-тонкие углеродные пленки [37]. В 2010 г. Андрей Гейм и Константин Новоселов получили Нобелевскую премию по физике за “пионерские эксперименты с 2D-мате-

риалом графеном”. Две симметричные углеродные подрешетки графена образуют конус Дирака с линейной дисперсией энергии носителей заряда – фермионов Дирака. Особенность этих частиц в том, что они безмассовые и ведут себя как фотоны. Как следствие, графен проявляет уникальные свойства. Графен прозрачен (97.7%) и устойчив к чрезвычайно высокой плотности тока (в миллион раз выше, чем у меди), имеет самую высокую подвижность электронов среди известных материалов ($\sim 10^6 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, что на 3 порядка выше, чем у кремния) и очень высокую теплопроводность ($K > 5 \times 10^3 \text{ Вт / (м К)}$), которая выше, чем у алмаза. Графен – это хорошо растяжимый (25%) материал с уникальной механической прочностью $E > 10^{12} \text{ Па}$ (в 6 раз выше, чем у атомарного слоя стали). Кроме того, графен биосовместим. Нейроны сетчатки способны выживать и выращивать нейриты на графене [38]. Более того, массивы графеновых полевых транзисторов могут регистрировать потенциалы действия от клеток [39]. Это позволяет создать искусственный дисплей сетчатки. Работа такого дисплея основана на обработке информации с интегрированной в очки камеры и ее дальнейшей передаче на графеновый имплант сетчатки, который стимулирует нервные клетки для передачи сигнала в мозг [40]. В 2017 г. на Mobile World Congress в Барселоне Каталонский институт нанонауки и нанотехнологий (ICN2) продемонстрировал протезы сетчатки на основе графена (рис. 5) [41], используя его преимущества в электрических свойствах, гибкости и биосовместимости. Такие устройства перспективны для восстановления зрения людям, утратившим функциональность светочувствительных клеток сетчатки. Сенсорные отклики встроенного графенового транзистора (GFET) на возбуждение зрительной коры показаны на рис. 6 [42]. Записи были получены от первичной зрительной и первичной слуховой коры крыс во время сенсорной стимуляции. Включение–выключение визуальной вызванной реакции происходило через 40 мс после стимула. Сигнал показывает основной компонент с частотой $\sim 20 \text{ Гц}$ с максимальной амплитудой 250 мкВ и длится 70 мс.

Особый интерес для разработки новых фоточувствительных устройств представляют фотомемристорные структуры на основе фотомемристивных 2D-материалов – дисульфида молибдена и графена/оксида графена (G/GO), а также квантовых точек на их основе [43–45], которые являются биосовместимыми и позволяют использовать нейроморфную архитектуру для аналоговых вычислений и технологий самосборки. Фотокаталитическое окисление графена представляет собой эффективный метод изготовления 2D-мемристоров с фоторезистивным переключением для энергонезависимой памяти сверхвысо-

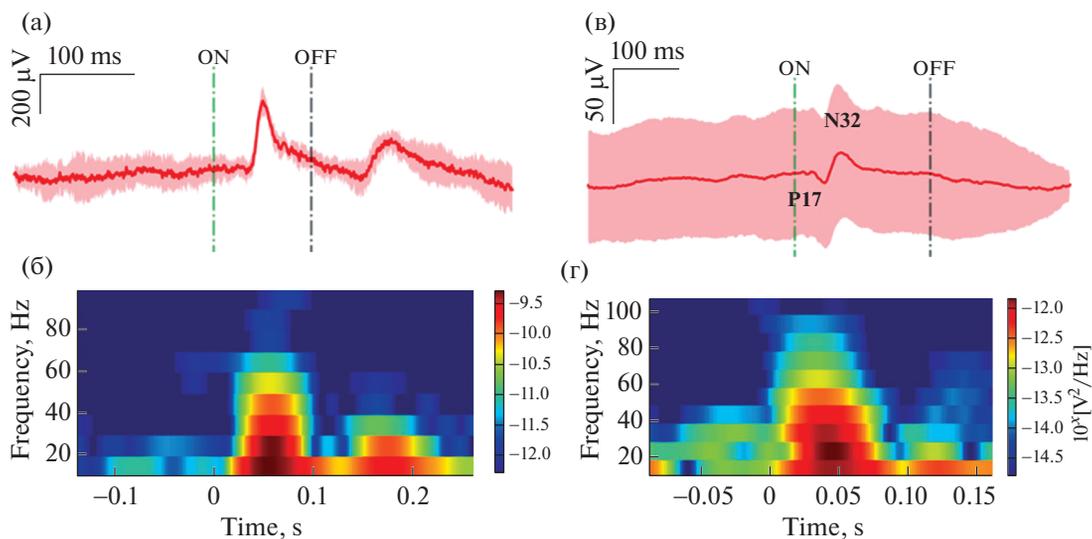


Рис. 6. Сенсорные вызванные ответы встроенного GFET: а – визуальный вызванный потенциал, б – спектрограмма зрительного вызванного потенциала, в – слуховой вызванный потенциал, г – спектрограмма слуховых вызванных потенциалов [42].

кой емкости. Новый тип многофункционального мемристора с фотозатвором, управляемый электрическими и оптическими сигналами в широком диапазоне длин волн, может использоваться для обработки изображений, распознавания образов, звуков, движений и речи, необходимых для создания искусственного интеллекта, а также для взаимодействия электронных сетей и нейронов.

1.3. Мемристоры на основе 2D-кристаллов

Мемристорная гетероструктура графен/оксид графена. В 2010 г. исследователи из ИПТМ РАН, МГУ и университета Dongguk продемонстрировали мемристор на основе структуры “графен/оксид графена (G/GO)”, который переключался при 0.7 В и 1 нА с отношением токов включения/выключения $\sim 10^3$ [46, 47]. Метод индуцированного электронным пучком тока позволил с высоким пространственным разрешением выявить образование хаотически распределенных токовых каналов-нитей (рис. 7) и изучить механизм переключения в этом устройстве, подобном синапсу. Сопротивление этого устройства в электрическом поле изменялось нелинейно, а значения высокого и низкого сопротивления были энергонезависимыми. Изучение механизмов резистивного переключения в G/GO показало, что миграция кислородсодержащих групп играет важную роль [48–51]. Одна связь углерода в sp^3 -гибридизации (связь С–О) на 10^6 связей углерода в sp^2 -гибридизации снижает проводимость углеродных наноматериалов на 50% [52]. Оксид графена с преимущественным содержанием углерода в sp^3 -гибридизации, обладающий низкой электропро-

водностью, демонстрировал переключение в электрическом поле за счет перехода углерода локально в sp^2 -гибридизацию, что приводило к высокой электропроводности. Этим процессом можно было управлять, контролируя миграцию кислородных групп.

В 2017 г. IBM анонсировала многоуровневую высокоскоростную энергонезависимую память на основе оксида графена [53]. Ячейка памяти толщиной 8 нм и размером 50 нм обладала четырехуровневым хранением информации (2 бита на ячейку) с временем записи и стирания менее 5 нс, а также продемонстрировала высокую воспроизводимость и возможность длительного хранения данных. Память с возможностью хранения более одного бита на ячейку, т.е. с многоуровневыми состояниями памяти, очень привлекательна, поскольку предлагает простой и экономичный способ увеличения емкости памяти (например, современные CMOS NAND-Flash обычно хранят 2 или 3 бита на ячейку). Сочетание возможности многоуровневого хранения с чрезвычайно высокой масштабируемостью особенно эффективно для реализации памяти со сверхвысокими объемами хранения. В этой структуре на основе оксида графена был продемонстрирован доступ к четырем хорошо разделенным и стабильным состояниям памяти в наноразмерных ячейках путем отслеживания длительности и амплитуды импульса записи [53]. Импульсы возбуждения с амплитудами от 2 до 6 В и длительностью от 20 до 80 нс использовали для определения условий успешной записи и стирания многоуровневых состояний памяти в структуре Pt/GO/Ti/Pt и мониторинга полученного сопротивления ячейки. Ячейки были полно-

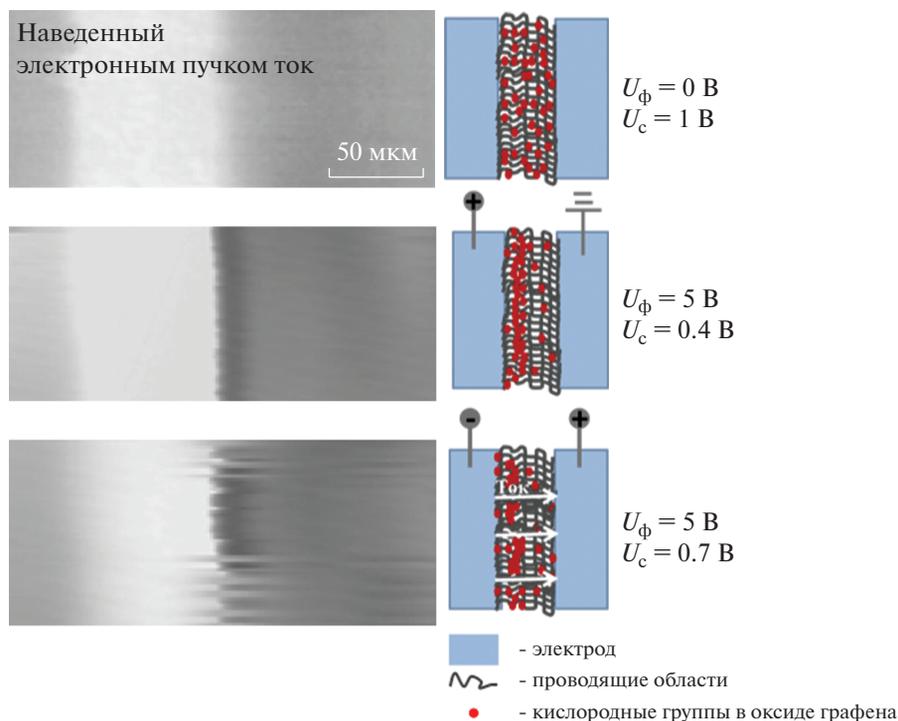


Рис. 7. Мемристорная структура на основе графена/оксида графена. Изображения структуры Al/GO/Al в СЭМ в режиме удаленного индуцированного электронным пучком тока (REBIC) с модуляцией встроенного потенциального барьера около отрицательно смещенного Al-электрода при различных напряжениях смещения (V_c) и формирующих напряжениях (V_ϕ) (слева). $V_c = 1$ В, $V_\phi = 0$ В (REBIC) (слева, вверху), $V_c = 0.4$ В, $V_\phi = 5$ В (REBIC) (слева, в центре), $V_c = 0.7$ В, $V_\phi = 5$ В (REBIC) (слева, внизу). Схема структуры Al/GO/Al при различных напряжениях V_c и V_ϕ (справа) [47].

стью переключены из состояния RESET, которое можно рассматривать как состояние 00, в состоянии памяти 01, 10 и 11 с использованием импульсов $-2.5/60$, $-3.5/60$ и $-4.5/60$ нс соответственно. Стирание ячеек из состояний 01, 10 и 11 обратно в состояние 00 было успешно достигнуто для импульсов $+3/60$, $+4/60$ и $+5/60$ нс соответственно. Хорошее разделение уровней промежуточного сопротивления позволило обеспечить надежный процесс считывания. Промежуточные уровни показали высокую надежность и стабильность во времени как на жестких, так и на гибких подложках. Обратимое резистивное переключение, наблюдаемое в этих устройствах, было связано с миграцией кислорода и, как следствие, приводило к изменению проводимости.

Фотокаталитическое окисление двух–трех слоев графена, покрытого слоем наночастиц ZnO с расстоянием между ними $\sim 10\text{--}15$ нм, в условиях УФ-облучения в присутствии молекул воды приводило к образованию самоорганизованных мемристоров G/GO с очень высокой плотностью (10^{12} см $^{-2}$) [49, 51]. Графен был синтезирован на медной фольге толщиной 25 мкм при 1020°C методом химического осаждения из газовой фазы с использованием смеси метана и водорода [49]. Выращенный графен переносили на подложку

SiO $_2$ /Si с использованием полиметилметакрилата. Наночастицы (НЧ) ZnO были получены термическим разложением соли цинка [49]. 0.005 М раствор ацетата цинка в этаноле наносили методом центрифугирования на подложку графен/SiO $_2$ /Si при 1000 об./мин, а затем отжигали при 350°C в течение 40 мин с образованием слоя НЧ. Двух–трехслойный графен, покрытый частицами, облучали в потоке влажного воздуха при комнатной температуре или выше (80°C) с использованием кварцевой УФ-лампы со световым потоком 0.03 Дж мин $^{-1}$ см 2 для его фотокаталитического окисления. Свет с длиной волны более 365 нм фильтровали. Время УФ-облучения составляло от 5 до 90 мин. После обработки ультрафиолетом НЧ ZnO растворяли в разбавленной 0.1 М HCl, подложку G/GO промывали деионизированной водой и сушили в азоте. На рис. 8 представлены схема фотокаталитического окисления графена с НЧ ZnO и электронная диаграмма границы раздела “графен/ZnO” при УФ-облучении. НЧ ZnO играют ключевую роль в процессе фотоокисления графена. Изгиб зон в НЧ ZnO вызван более низкой работой выхода электронов в ZnO (3.6 эВ) по сравнению с графеном (4.5 эВ). Электрон-дырочные пары, генерируемые в ZnO (3.3 эВ) при УФ-облучении (реакция 1), разделя-

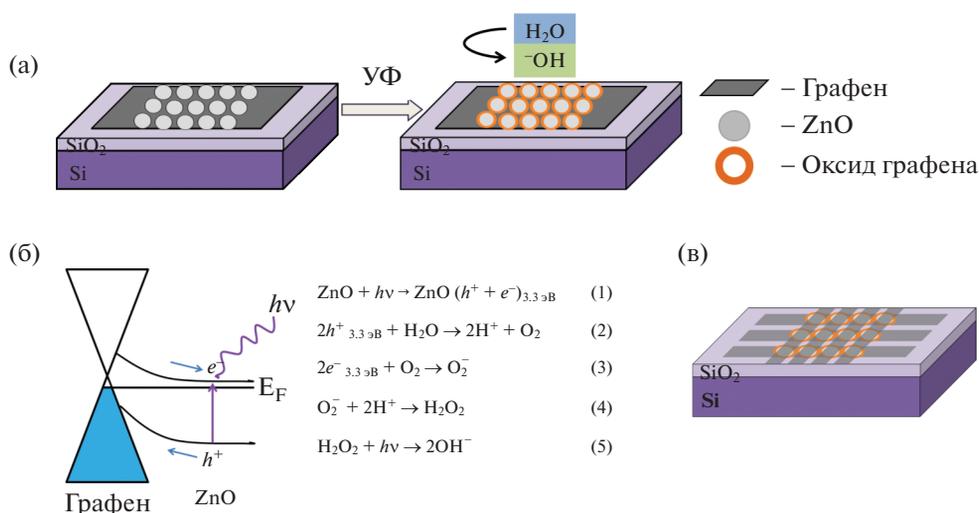


Рис. 8. Схема фотокаталитического окисления графена, покрытого наночастицами ZnO, в УФ-свете в присутствии молекул воды с образованием гетероструктур G/GO на подложке Si/SiO₂ (а); зонная диаграмма границы раздела G/ZnO при УФ-облучении. Электронно-дырочные пары, генерируемые в ZnO ($E_g = 3.3$ эВ) при УФ-облучении (реакция 1), разделяются во встроенном электрическом поле на границе раздела G/ZnO, обеспечивая поток дырок в графен (б), схематическое изображение матрицы фотомемристоров G/GO в геометрии перекрещивающихся графеновых электродов, полученных фотокаталитическим окислением графена с наночастицами ZnO (в).

ются во встроенном электрическом поле на границе “графен/ZnO”, которое обеспечивает поток дырок (3.3 эВ) в графен. В результате графен был окислен высоко активными гидроксильными радикалами (OH) (реакции 3–5), формирующимися в процессе фоторазложения молекул воды из влажного воздуха. Управление распределением НЧ ZnO на графене на нанометровом уровне (~10 нм) позволяет создавать высоко масштабированные наногетеропереходы G/GO для памяти сверхвысокой плотности (до 10^{12} см⁻² или 1 Тбайт на чип с вертикальной геометрией перекрещивающихся электродов, рис. 8в). Состояния мемристоров с плавающим фотозатвором могут считываться электрически и при оптическом возбуждении. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) графена до окисления линейна и показывает высокую проводимость (рис. 9а). Фотокаталитический процесс приводит к уменьшению проводимости графена и нелинейному поведению ВАХ, указывающему на образование запрещенной зоны в окисленном графене. Повышение температуры влажного воздуха сокращает время окисления. Гетероструктуры G/GO, полученные фотокаталитическим окислением в атмосфере влажного воздуха при температуре 20°C в течение 30 мин и при 80°C в течение 5 мин, демонстрируют нелинейное поведение ВАХ, что указывает на появление запрещенной зоны ~3 эВ и снижение проводимости окисленного графена на 2 порядка величины. Сформированные наноструктуры G/GO показали хорошую светочувствительность к белому свету и фоторезистивное переключение.

Фототок увеличивался примерно в 6 раз при напряжении смещения >3 В. Это указывает на то, что электрон-дырочные пары, генерируемые светом, эффективно разделяются в смещенном электрическом поле гетеропереходах G/GO. На рис. 9б показаны ВАХ предварительно сформированной наноструктуры G/GO (+5 В, 15 мин) при развертке напряжения от -4 до 4 В при белом свете и в темноте. Хорошо воспроизводимый биполярный гистерезис указывает на резистивное переключение структуры с отношением токов включения/выключения ~10 для четырех различных резистивных состояний HRSD, LRSD, LRSL и HRSR в темноте и на свету с переключающими напряжениями -3.8/3.3 В (сброс/установка) и -3.5/4 В (установка/сброс) соответственно (рис. 9в, 9г).

Вертикальные мемристивные структуры G/GO были изготовлены с наностержнями ZnO, выращенными на графене (рис. 10а, 10б). Стержни ZnO использовали для селективного возбуждения структуры G/GO/ZnO УФ-светом ~380 нм. Резистивное переключение в такой структуре наблюдали при напряжениях <1 В с отношением высокого/низкого сопротивления 10^3 после процесса формовки при 1 В (рис. 10в, 10г) [51]. Полученные данные указывают на перспективность структур на основе графена для мемристивных устройств высокой плотности и низкого энергопотребления [54].

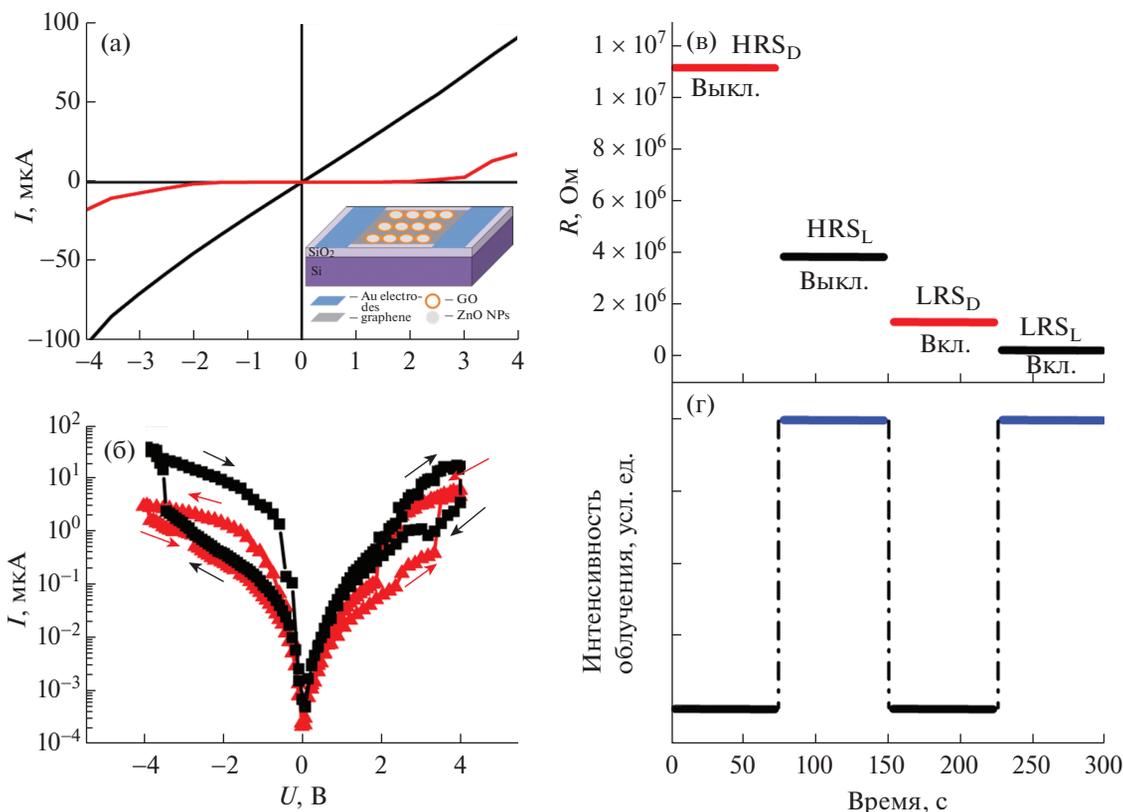


Рис. 9. ВАХ структуры G/ZnO до и после (темная и более светлая линии соответственно) фотокаталитического окисления во влажном воздухе в течение 30 мин при 20°C (а), на вставке схема для измерения структуры с боковыми золотыми электродами. ВАХ наноструктуры G/GO, предварительно поляризованной (+5 В, 15 мин) при возбуждении белым светом (темная кривая) и в темноте (более светлая кривая) (б). Резистивные состояния фотомемристора G/GO, переключаемые напряжением смещения $-3.8/3.3$ В (сброс/установка) в темноте и $-3.5/4$ В (установка/сброс) с импульсами белого света (в) и считываемые при 2.5 В (г) [48].

2. ФОТОМЕМРИСТОРНЫЕ СИСТЕМЫ

2.1. Фотомемристоры на основе 2D-кристаллов MoS₂

Фотомемристорная MoS₂-структура, поляризованная в электрическом поле при различных условиях освещения, демонстрирует многоуровневое переключение [55]. Нанокристаллы MoS₂ были выращены гидротермальным методом. Дисперсию MoS₂ в изопропиловом спирте нанесли методом центрифугирования на подложку Si/SiO₂ с последующим отжигом при 200°C в течение 15 мин. Electrodes из золота были изготовлены с использованием фотолитографии и “взрывного” процесса. После литографии образцы отжигали в потоке 200 см³/мин (H₂/N₂ = 2: 3) при 450°C в течение 15 мин. На рис. 11 показаны ВАХ структуры Au/MoS₂/Au (рис. 11а, вставка) после поляризации при 3 и 6 В. Нелинейные характеристики устройства с гистерезисом указывают на мемристивное поведение. Кроме того, мемристор демонстрирует фотоотклик при освещении белым светом. Когда устройство поляри-

зовано при 3 В, плавное переключение HRS_{L3} в LRS_{L3} наблюдается при освещении и HRS_{D3} в LRS_{D3} в темноте с соотношением токов включения (Вкл)/выключения (Выкл) около 2 и 4 при 1.2 и 0.7 В соответственно (рис. 11а). При более высоком напряжении (6 В) устройство демонстрирует резкое переключение при возбуждении белым светом, с HRS_{L6} в LRS_{L6} при -2.9 В с соотношением токов Вкл/Выкл около 10 и плавное переключение с HRS_{D6} в LRS_{D6} в темноте с отношением токов Вкл/Выкл около 3 при 0.7 В (процесс SET записи состояния ON, рис. 10б). Когда подаваемое напряжение изменяется с 0 на положительное (4.2 В), устройство возвращается к HRS_{L6} (операция RESET). Мемристивное поведение устройства в темноте и на свету хорошо воспроизводится свыше 1000 циклов (рис. 10в, 10г) и демонстрирует возможность получения в структуре многоуровневого резистивного переключения и управления им с помощью электрического поля в темноте и на свету. Отметим, что резистивное переключение, управляемое поляризацией наносфер MoS₂, является более быстрым процессом,

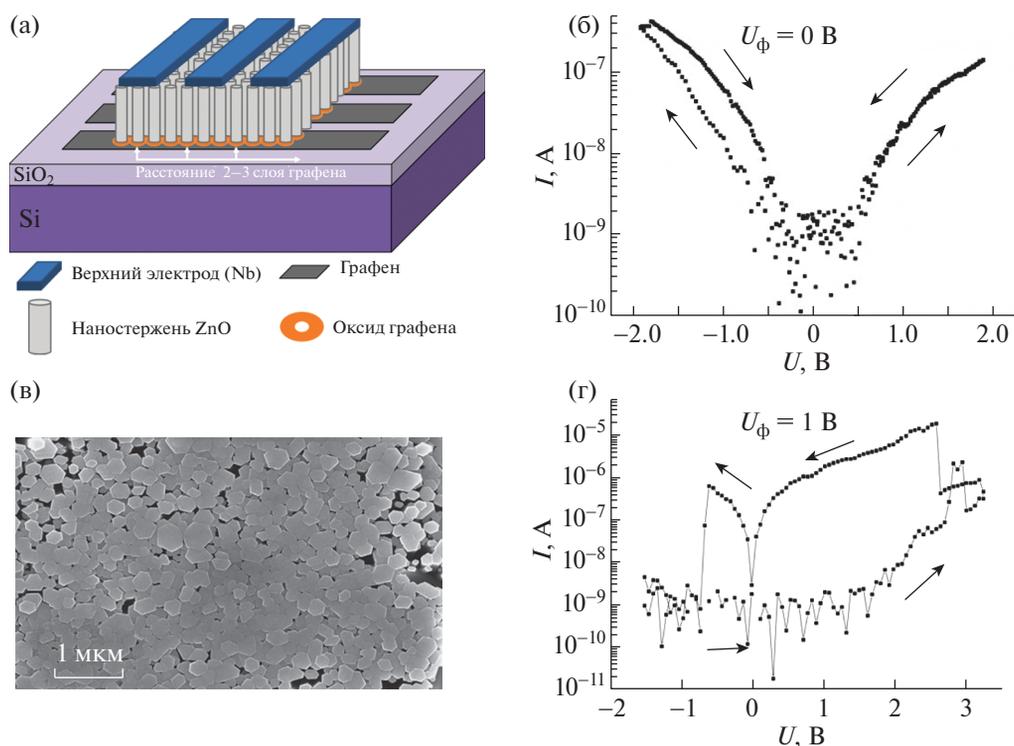


Рис. 10. Схема массивов фотомемристоров G/GO/стержни ZnO в вертикальной геометрии (а) и СЭМ-изображение структуры (б) с их вольтамперными характеристиками до (в) и после формовки (г).

чем перенос ионов, а частота оптического доступа намного выше, чем электрическая адресация. Мемристор, поляризованный при 3 В в темноте или в белом свете, демонстрирует четыре состояния, которые считываются при напряжении 0.7 В (HRS_{D3} и LRS_{D3}) и 1.2 В (HRS_{L3} и LRS_{L3}) в темноте или при белом свете [55]. Поляризация мемристора при 6 В в темноте или на свету приводит к формированию еще четырех состояний, которые считываются при напряжении 0.7 В (HRS_{D6} и LRS_{D6}) и 4 В (HRS_{L6} и LRS_{L6}) в темноте или на свету. Эти состояния управляются электрически и оптически, что подтверждается итерационной работой мемристора при различных условиях записи и считывания [55]. Поляризация наносфер в фотомемристоре с помощью электрического поля и световых импульсов создает многоуровневые состояния. Анализ проводимости в этих состояниях сопротивления показывает, что поляризация наносфер при возбуждении светом приводит к образованию проводящих каналов. Уменьшение зазора между электродами значительно снижает рабочее напряжение устройства. Модуляция высоты барьера на границах наносфер во внешнем электрическом поле светом за счет деполяризации является высокоэффективным процессом для высокоскоростной обработки сигналов. Мемристор, поляризованный при 3 и 6 В, имеет разные состояния, которые могут быть электри-

чески считаны при оптическом возбуждении в виде четырех состояний с высоким сопротивлением и четырех состояний с низким сопротивлением. Оптическая и электрическая поляризация структуры наряду с быстрыми фазовыми переходами в MoS₂ [45, 56] обеспечивает несколько нелинейных динамических процессов, позволяющих создавать систему с нейроморфной архитектурой, подобной нейронной сети.

3. ДАТЧИКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ФОТОННЫЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

3.1. Матрицы датчиков изображения на основе графен–MoS₂

В 2017 г. была продемонстрирована ультратонкая матрица датчиков изображения с полусферическими изгибами в качестве элемента визуализации в мягком имплантате сетчатки [57]. Матрица CurvIS применяется в качестве мягкого имплантируемого оптоэлектронного устройства, подобного человеческому глазу, которое может обнаруживать оптические сигналы и применять запрограммированную электрическую стимуляцию к зрительным нервам с минимальными механическими побочными эффектами на сетчатку. Ультратонкий 2D-кристалл на основе MoS₂ [58–60] является многообещающим кандидатом на роль фотопоглощающего компонента во всена-

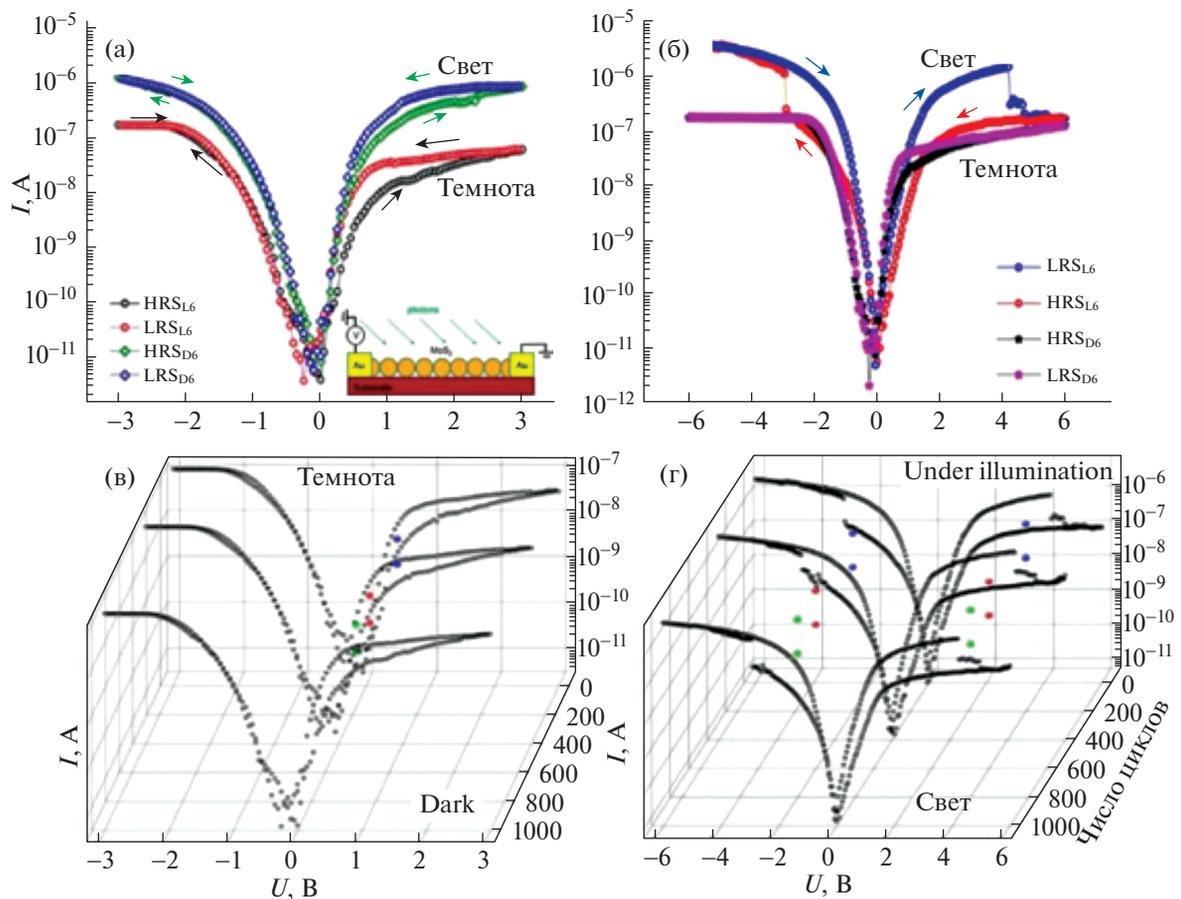


Рис. 11. Резистивное переключение наносферного фотомемристора Au/MoS₂/Au. ВАХ структуры в темноте и при белом свете (спектральные максимумы при 2.7 и 1.8 эВ; схема прибора на вставке при световом возбуждении) (а). Стрелки на кривых указывают направление развертки напряжения; ВАХ структуры после ее поляризации при 3 В. Устройство плавно переключается с HRS_{L3} в LRS_{L3} при свете и с HRS_{D3} в LRS_{D3} в темноте с соотношением токов включения/выключения около 2 и 4 при 1.2 и 0.7 В соответственно. ВАХ структуры после поляризации напряжением 6 В (б). Устройство показывает резкое изменение сопротивления при возбуждении светом, с HRS_{L6} в LRS_{L6} при -9.2 В с отношением токов включения/выключения около 10 и плавный переход от HRS_{D6} к LRS_{D6} без возбуждения светом с отношением токов включения/выключения около 3 при 0.7 В. Мемристивные характеристики структуры после серии циклов в темноте (в) и при возбуждении ее светом (г) [55].

правленной матрице CurvIS благодаря уникальным преимуществам, таким как превосходный коэффициент поглощения ($> 5 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$) [61], высокая светочувствительность (2200 А/Вт) [62] и высокая деформация разрушения (~23%) [59]. Мягкость [59–63] и сверхтонкая толщина [64, 65] MoS₂ являются дополнительными факторами, позволяющими изготавливать мягкое оптоэлектронное устройство. Массив CurvIS из MoS₂-графена высокой плотности успешно распознает различные проецируемые изображения без ИК-шума биологического объекта. Схема одиночного фотосенсора показана на вставке к рис. 12а. Передаточная кривая ($I_d - V_g$) показывает типичное поведение светочувствительного транзистора (рис. 12б). При освещении (515 нм) канал MoS₂ генерирует фототок, нормализованная ве-

личина которого (I_d/I_{dark}) пропорциональна интенсивности света (рис. 12в). Фоточувствительность фотосенсора MoS₂-графен сравнивается с теоретической светочувствительностью кремниевых фотодиода, толщина кремния в котором такая же, как у MoS₂ (рис. 12г). Видно, что фоточувствительность структуры MoS₂-графен на 2–3 порядка выше фоточувствительности кремниевых фотодиода, что связано с эффективным поглощением MoS₂ [57]. Обычные кремниевые датчики изображения поглощают ИК-свет (850 нм) (рис. 12д, вставка), который вызывает ИК-шумы. Фотодетектор MoS₂ не поглощает ИК-излучение из-за его более широкой запрещенной зоны (рис. 12д). Поэтому для устройства на основе MoS₂ не нужен ИК-фильтр, что позволяет уменьшить толщину и повысить мягкость

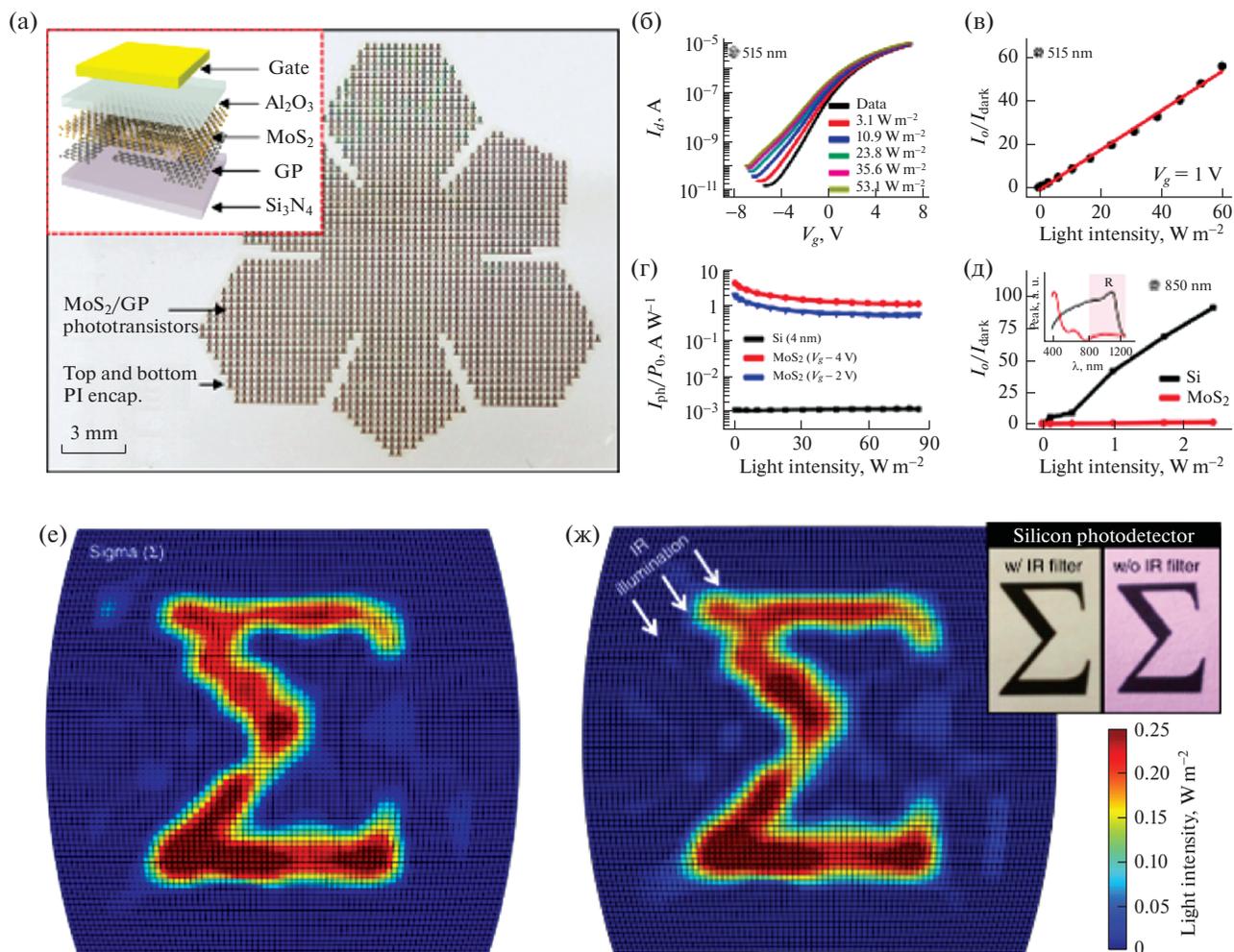


Рис. 12. Характеристики устройства и получение изображений с помощью изогнутой матрицы датчиков изображения. Изображение с оптической камеры матрицы фототранзисторов в виде усеченного икосаэдра на плоской подложке (а). На вставке схематично показана конструкция устройства. Передаточные кривые фототранзистора при различной интенсивности света (515 нм) (б). Фоточувствительность структуры MoS₂–графен по сравнению с кремниевым фотоприемником той же толщины (г). Нормализованное изменение фототока при ИК-освещении (850 нм) различной интенсивности (д) [57].

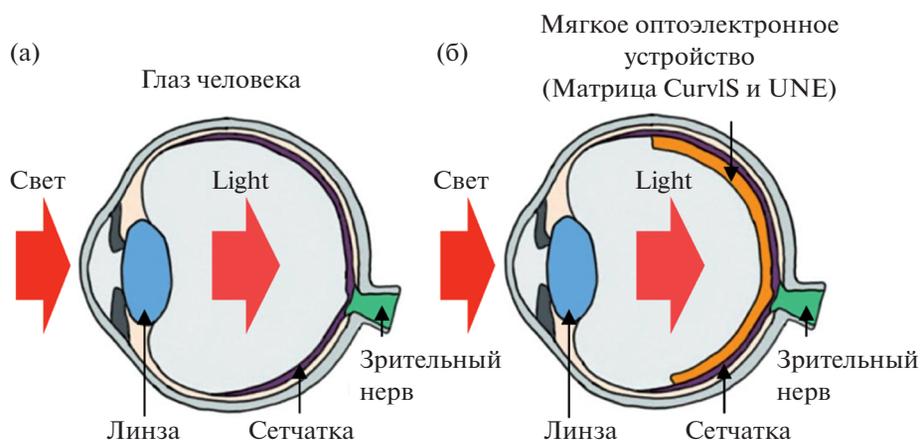


Рис. 13. Мягкое оптоэлектронное устройство, подобное человеческому глазу [57].

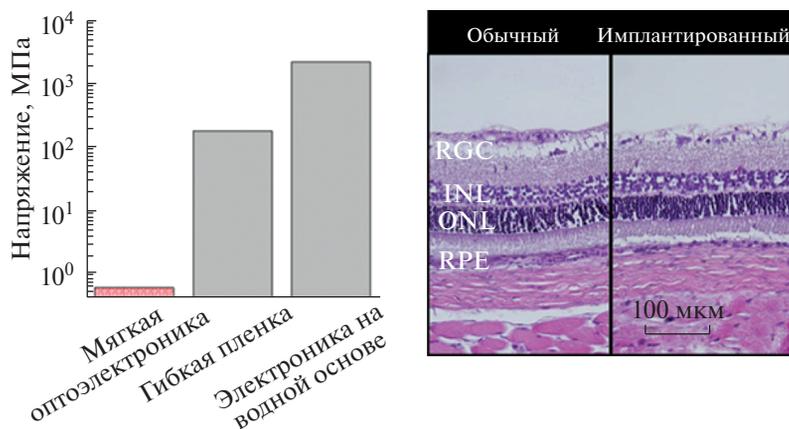


Рис. 14. Механические напряжения, вызываемые различными имплантированными устройствами [57].

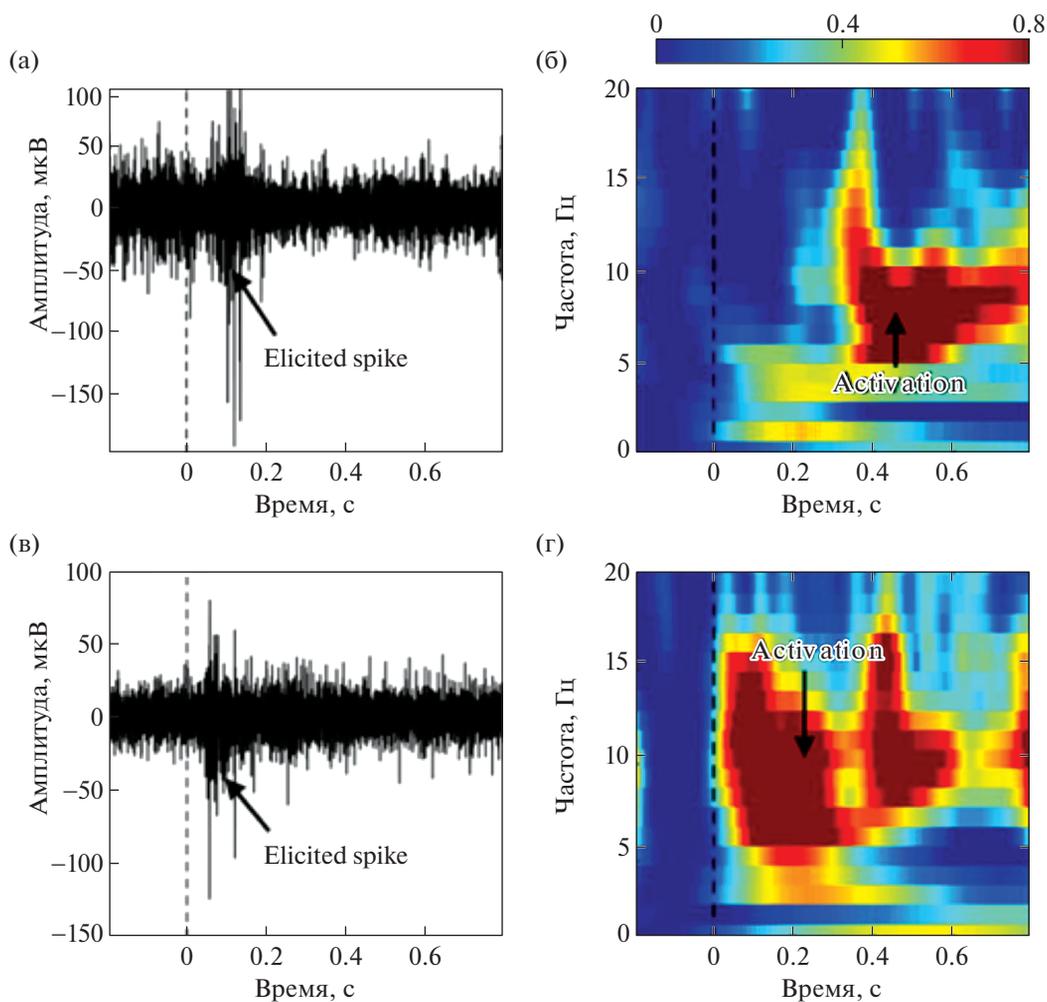


Рис. 15. Стимуляция сетчатки мягким оптоэлектронным устройством. Запись нейронных сигналов от зрительной коры. Измерение вызванных спайков (а) и изменений потенциала локального поля (LFP) (б) в зрительной коре с помощью оптической стимуляции. Измерение вызванных спайков (в) и изменений LFP в зрительной коре с помощью электрической стимуляции (г) [57].

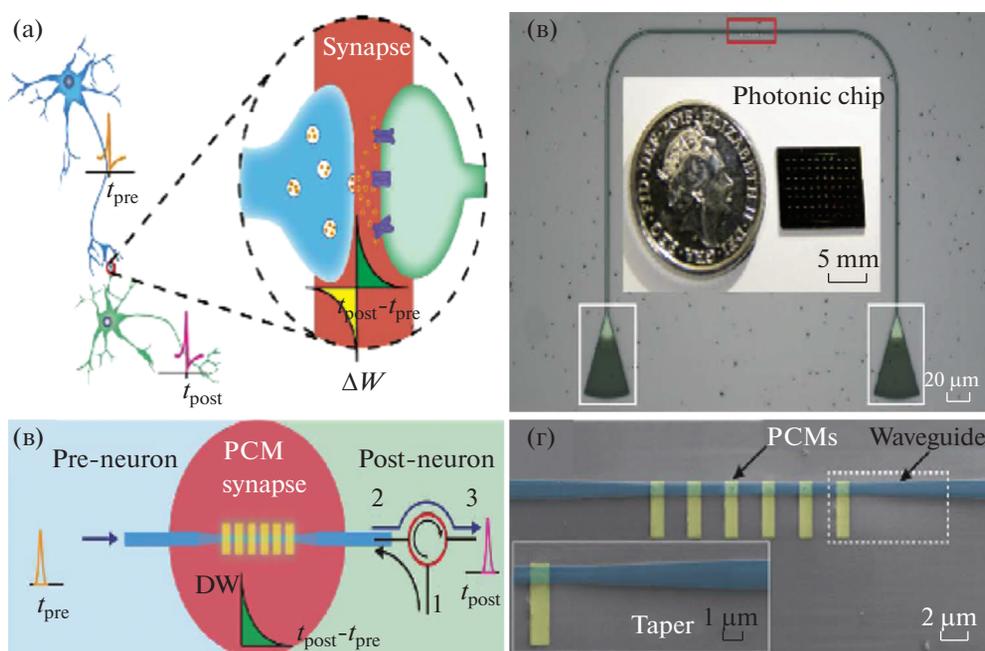


Рис. 16. Фотонный синапс на кристалле. Структура нейрона и синапса, на вставке — синапс (а). Схема интегрированного фотонного синапса, моделирующая функцию нервного синапса (б). Синапс основан на конусообразном волноводе (горизонтальная дорожка) с вертикальными дискретными островками РСМ сверху, оптически соединяющими пресинаптические (пренейронные) и постсинаптические (постнейронные) сигналы. Открытый кружок — циркулятор с портом 2 и портом 3, соединяющий синапс и постнейрон; взвешивающие импульсы подаются через порт 1 в синапс. Изображение устройства с активной областью (прямоугольник сверху) в качестве фотонного синапса, полученное с помощью оптического микроскопа. Оптический ввод и вывод устройства осуществляется через аподированные дифракционные ответвители (прямоугольники внизу). Типичный фотонный чип, содержащий 70 фотонных синапсов, меньше монеты. СЭМ-изображение активной области фотонного синапса (г), соответствующей прямоугольнику сверху на оптическом изображении, с шестью вертикальными полосками GST ($1 \times 3 \text{ мкм}^2$) на конце волновода. Вставка: увеличенная коническая волноводная структура, помеченная пунктирной рамкой [71].

массива CurvIS. Матрица CurvIS визуализирует сигму (Σ) (рис. 12е) с помощью одной плоско-выпуклой линзы. На захваченное изображение ИК-излучение не влияет (рис. 12ж) из-за ИК-прозрачности структуры на основе MoS_2 (рис. 12д), в то время как матрица обычных кремниевых фотоприемников без ИК-фильтра показывает ИК-шумы (рис. 12ж, вставка справа). Ультратонкая матрица CurvIS, форма и механическая мягкость которой аналогичны сетчатке глаза человека, имеет большой потенциал для использования ее в качестве мягкого фотодетекторного компонента в протезе сетчатки. Человеческий глаз состоит из линзы, собирающей свет, сетчатки, преобразующей свет в потенциалы действия, и зрительных нервов, передающих потенциалы действия в мозг (рис. 13а). Мягкое имплантируемое оптоэлектронное устройство улавливает свет на большой площади, как сетчатка человека (рис. 13б), имитирует структурные особенности человеческого глаза и вызывает минимальную его деформацию. Напряжение для этой модели искусственного глаза на порядок ниже, чем для других (0.61 МПа, рис. 14) [57].

На рис. 15 показана запись нервных сигналов от зрительной коры при оптической и электрической стимуляции сетчатки [57]. Возбуждение зрительных нервов контролировали с помощью проникающих к нерву электродов. Стимуляция сетчатки [66, 67] подтверждается вызванными импульсами [68] и изменениями в потенциале локального поля (LFP) [69], которые одновременно измеряли в первичной зрительной коре головного мозга крысы [68, 70]. Когда к глазу крысы подаются импульсные оптические сигналы, сетчатка крысы воспринимает включение/выключение света. Эта оптическая информация передается в зрительную кору через зрительные нервы, в результате чего возникают спайки (рис. 15б) и изменения LFP в диапазоне частот 4–15 Гц (рис. 15в). Точно так же мягкое оптоэлектронное устройство на основе MoS_2 –графена обнаруживает включение/выключение света, и соответствующие электрические импульсы подаются на зрительный нерв через ультратонкие нейроинтерфейсные электроды. Следовательно, зрительная кора аналогичным образом активируется, что приводит к

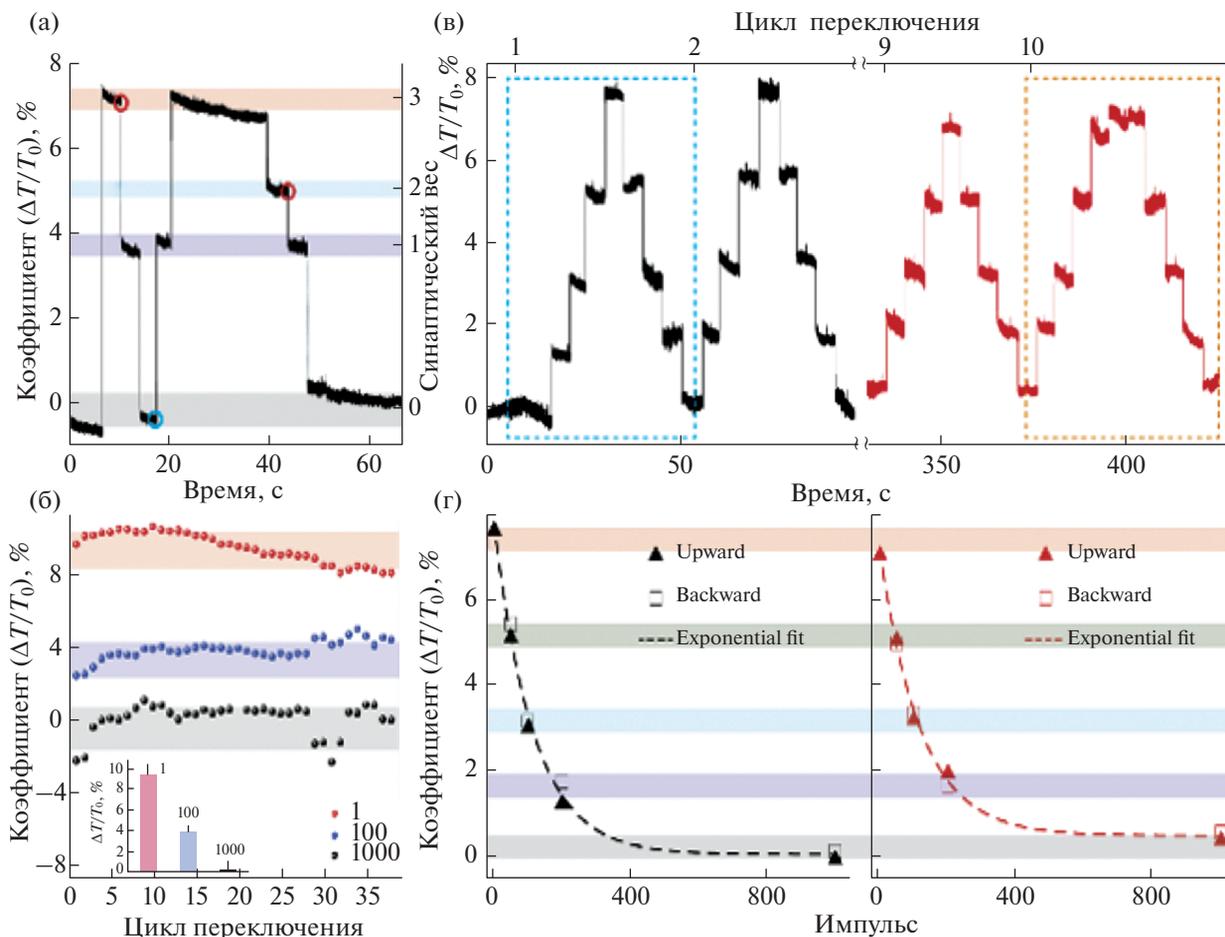


Рис. 17. Синаптический вес и пластичность. Демонстрация дифференциального синаптического веса устройства на рис. 16 при переключении между кристаллическим и аморфным состояниями GST островков с зарегистрированным относительным изменением коэффициента ($\Delta T/T_0$). Каждый вес может быть получен с помощью одинакового количества импульсов (50 нс при 243 пДж, 1 МГц) от любого предыдущего веса (а). Повторяемость веса в течение нескольких циклов (б). Вставка: статистический анализ изменения показаний веса “0”, “1” и “4”. Приложенный импульс составлял 50 пс при 320 пДж, что немного больше, чем при измерениях, показанных на (а). Пять весов фотонного синапса получают при переключении энергии оптического импульса (404.5 пДж, 50 нс) (в). Пунктирные прямоугольники слева и справа соответствуют первому и последнему циклу взвешивания соответственно. Стрелки вверх и вниз в прямоугольниках указывают на направление взвешивания. Синаптический вес фотона ($\Delta T/T_0$) как функция количества оптических импульсов (г). Левая (правая) панель соответствует данным, отмеченным левым и правым прямоугольником на (в). Закрашенные треугольники (незакрашенные квадраты) – данные для восходящего (нисходящего) направления взвешивания. Пунктирные линии – экспоненциальные кривые, наиболее близкие к экспериментальным данным [71].

появлению спайков (рис. 15г) и изменениям LFP в том же частотном диапазоне (рис. 15д).

3.2. Фотонный чип с фотонными синапсами

Фотонный чип, содержащий 70 фотонных синапсов, был продемонстрирован в 2017 г. командой из университетов Оксфорда, Мюнстера и Эксетера [71]. Запись, стирание и считывание информации в этом случае полностью осуществляются оптическими методами.

Фотонный синапс состоит из конусообразного волновода (рис. 16) с дискретными островками материала с фазовым переходом сверху, оптиче-

ски соединяющими пресинаптические (пренейронные) и постсинаптические (постнейронные) сигналы. Использование чисто оптических средств обеспечивает сверхбыструю скорость работы, практически неограниченную полосу пропускания и отсутствие потерь электроэнергии в межсоединениях. Важно отметить, что синаптический вес может быть установлен случайным образом, просто изменяя количество оптических импульсов, создающих систему с постоянно изменяющейся синаптической пластичностью, отражающей истинную аналоговую природу биологических синапсов. Синаптическая настройка устройства при переключении между кристалли-

ческим и аморфным состояниями островков $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) с зарегистрированным изменением относительного коэффициента пропускания показана на рис. 17. Пять весовых состояний фотонного синапса получаются переключением энергии оптического импульса (404.5 пДж, 50 нс). Фотонный синапс демонстрирует хорошую воспроизводимость весовых чисел при циклических измерениях. В этом случае вес фотонного синапса определяется количеством оптических импульсов.

ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Мемристивные системы на основе 2D-кристаллов – это новый класс энергонезависимых электронных компонентов, открывающих возможность для высокопроизводительных вычислений и считывания визуальной информации с низким энергопотреблением в реальном времени. Самособирающиеся синапсоподобные мемристоры на основе графена, управляемые переходами углерода в sp^3 - и sp^2 -гибридизациях под действием электрического поля, могут быть использованы для взаимодействия искусственных нейронных сетей и биологических нейронов. 2D-фото-мемристоры с плавающим фотозатвором демонстрируют несколько состояний, контролируемых в широком диапазоне электромагнитного излучения, и могут найти применение для широкого круга задач, связанных с нейроморфными вычислениями, обработкой и распознаванием образов, необходимых для решения задач создания искусственного зрения. Развитие технологий формирования самоорганизующихся искусственных нейронных сетей и гетероинтерфейсных взаимодействий на основе биосовместимых 2D-кристаллов с нейронами позволит создать устойчивые нейроморфные системы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 19-29-03050 (ГНП), № 21-33-70119 (ООК)) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-00920-20-00 (ГНП).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Flaherty N.* “Samsung Foundry tapes out 3nm GAA chip”. 2021. <https://www.eenewseurope.com/news/samsung-foundry-tapes-out-3nm-gaa-chip>
2. *Desai S.B., Madhvapathy S.R., Sachid A.B. et al.* // *Science*. 2016. V. 354. № 6308. P. 99. <https://doi.org/10.1126/science.aah4698>
3. *Liu T.-J.K.* CMOS and Beyond: Logic Switches for Terascale Integrated Circuits. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 436 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107337886>
4. *Lecun Y., Bengio Y., Hinton G.* // *Nature*. 2015. V. 521. № 7553. P. 436. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
5. *Hopfield J.J.* // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 1982. V. 79. № 8. P. 2554. <https://doi.org/10.1073/pnas.79.8.2554>
6. *Hochreiter S., Schmidhuber J.* // *Neural Comput.* 1997. V. 9. № 8. P. 1735. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
7. *Torrejon J., Riou M., Araujo F.A. et al.* // *Nature*. 2017. V. 547. № 7664. P. 428. <https://doi.org/10.1038/nature23011>
8. *Romera M., Talatchian P., Tsunegi S. et al.* // *Nature*. 2018. V. 563. № 7730. P. 230. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0632-y>
9. *Velichko A., Belyaev M., Boriskov P.* // *Electron.* 2019. V. 8. № 1. P. 75. <https://doi.org/10.3390/electronics8010075>
10. *Du C., Cai F., Zidan M.A. et al.* // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. № 1. P. 2204. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02337-y>
11. *Zhong Y., Tang J., Li X. et al.* // *Nat. Commun.* 2021. V. 12. № 1. P. 408. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20692-1>
12. *Velichko A.A., Ryabokon D.V., Khanin S.D. et al.* // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020. V. 862. № 5. P. 052062. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/5/052062>
13. *Nakane R., Tanaka G., Hirose A.* // *IEEE Access*. 2018. V. 6. P. 4462. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2794584>
14. *Martinenghi R., Rybalko S., Jacquot M. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. № 24. P. 244101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.244101>
15. *Vandoorne K., Mechet P., Van Vaerenbergh T. et al.* // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. № 1. P. 3541. <https://doi.org/10.1038/ncomms4541>
16. *Antonik P., Dupont F., Hermans M. et al.* // *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.* 2017. V. 28. № 11. P. 2686. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2598655>
17. *Moon J., Ma W., Shin J.H. et al.* // *Nat. Electron.* 2019. V. 2. № 10. P. 480. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0313-3>
18. *Midya R., Wang Z., Asapu S. et al.* // *Adv. Intell. Syst.* 2019. V. 1. № 7. P. 1900084. <https://doi.org/10.1002/aisy.201900084>
19. *Kulkarni M.S., Teuscher C.* // *Proc. 2012 IEEE/ACM Int. Symp. Nanoscale Archit. NANOARCH 2012*. New York, USA. ACM Press. 2012. P. 226. <https://doi.org/10.1145/2765491.2765531>
20. *Yao P., Wu H., Gao B. et al.* // *Nature*. 2020. V. 577. № 7792. P. 641. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1942-4>
21. *Yao P., Wu H., Gao B. et al.* // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. № 1. P. 15199. <https://doi.org/10.1038/ncomms15199>

22. *Hu M., Graves C.E., Li C. et al.* // *Adv. Mater.* 2018. V. 30. № 9. P. 1705914. <https://doi.org/10.1002/adma.201705914>
23. *Yang J.J., Strukov D.B., Stewart D.R.* // *Nat. Nanotechnol.* 2013. V. 8. № 1. P. 13. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.240>
24. *Cai F., Correll J.M., Lee S.H. et al.* // *Nat. Electron.* 2019. V. 2. № 7. P. 290. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0270-x>
25. *Tang J., Yuan F., Shen X. et al.* // *Adv. Mater.* 2019. V. 31. № 49. P. 1902761. <https://doi.org/10.1002/adma.201902761>
26. *Panin G.N.* // *Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics. (in Russian).* 2018. V. 1. № 169. P. 23.
27. *Chua L.O.* // *IEEE Trans. Circuit Theory.* 1971. V. 18. № 5. <https://doi.org/10.1109/TCT.1971.1083337>
28. *Lossev O.* // *Nature.* 1914. V. 92. № 2312. P. 682. <https://doi.org/10.1038/092682a0>
29. *Lossev O.V.* // *Wirel. World Radio Rev.* 1924. V. 15. № 271. P. 93.
30. *Panin G.N., Baranov A.N., Kononenko O.V. et al.* // *AIP Conf. Proc.* 2007. V. 893. P. 743. <https://doi.org/10.1063/1.2730104>
31. *Panin G.* // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 2016. V. 1812. P. K04.
32. *Baranov A.N., Panin G.N., Yoshimura M., Oh Y.J.* // *J. Electroceramics.* 2006. V. 17. № 2–4. P. 847. <https://doi.org/10.1007/s10832-006-9011-4>
33. *Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S.* // *Nature.* Nature Publishing Group. 2009. V. 459. № 7250. P. 1154. <https://doi.org/10.1038/nature08166>
34. *Sokoloff L.* The metabolism of the central nervous system *in vivo* // *J. Field / Eds. Magoun H.W., Hall V.E., Handbook of Physiology—Neurophysiology.* Washington, D.C.: American Physiological Society. 1960. V. 3. P. 1843.
35. *Shapson-Coe A., Januszewski M., Berger D.R. et al.* // *bioRxiv.* 2021. P. 2021.05.29.446289. <https://doi.org/10.1101/2021.05.29.446289>
36. *von Bartheld C.S., Bahney J., Herculano-Houzel S.* // *J. Comp. Neurol.* 2016. V. 524. № 18. P. 3865. <https://doi.org/10.1002/cne.24040>
37. *Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. et al.* // *Science.* 2004. V. 306. № 5696. P. 666. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
38. *Bendali A., Hess L.H., Seifert M. et al.* // *Adv. Healthc. Mater.* 2013. V. 2. № 7. P. 929. <https://doi.org/10.1002/adhm.201200347>
39. *Hess L.H., Jansen M., Maybeck V. et al.* // *Adv. Mater.* 2011. V. 23. № 43. P. 5045. <https://doi.org/10.1002/adma.201102990>
40. *Hess L.H., Seifert M., Garrido J.A.* // *Proc. IEEE.* 2013. V. 101. № 7. P. 1780. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2261031>
41. <https://asociaciondoce.com/2017/03/27/desarrollan-protesis-de-retina-basada-en-grafeno/>
42. *Hébert C., Masvidal-Codina E., Suarez-Perez A. et al.* // *Adv. Funct. Mater.* 2018. V. 28. № 12. P. 1703976. <https://doi.org/10.1002/adfm.201703976>
43. *Fu X., Ilanchezhyan P., Mohan Kumar G. et al.* // *Nanoscale.* 2017. V. 9. № 5. P. 1820. <https://doi.org/10.1039/c6nr09022b>
44. *Kovaleva N.N., Chvostova D., Potůček Z. et al.* // *2D Mater.* 2019. V. 6. № 4. P. 045021. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab2ee9>
45. *Fu X., Zhang L., Cho H.D. et al.* // *Small.* 2019. V. 15. № 45. P. 1903809. <https://doi.org/10.1002/smll.201903809>
46. *Panin G.N., Kapitanova O.O., Lee S.W. et al.* // *Proceedings of 2nd Int. Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics and Modeling, Sendai, Japan, 2010.* V. 1. P. 94.
47. *Panin G.N., Kapitanova O.O., Lee S.W. et al.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2011. V. 50. № 7 PART 1. <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.070110>
48. *Kapitanova O.O., Panin G.N., Cho H.D. et al.* // *Nanotechnology.* 2017. V. 28. № 20. P. 204005. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa655c>
49. *Kapitanova O.O.* Thesis “Nanostructures with resistive switching based on graphene oxide” PhD in chemistry. M.: Lomonosov Moscow State University, 2015.
50. *Kapitanova O.O., Panin G.N., Baranov A.N., Kang T.W.* // *J. Korean Phys. Soc.* 2012. V. 60. № 10. P. 1789. <https://doi.org/10.3938/jkps.60.1789>
51. *Kapitanova O.O., Panin G.N., Kononenko O. V. et al.* // *J. Korean Phys. Soc.* 2014. V. 64. № 10. P. 1399. <https://doi.org/10.3938/jkps.64.1399>
52. *Goldsmith B.R., Coroneus J.G., Khalap V.R. et al.* // *Science.* 2007. V. 315. № 5808. P. 77. <https://doi.org/10.1126/science.1135303>
53. *Nagareddy V.K., Barnes M.D., Zipoli F. et al.* // *ACS Nano.* 2017. V. 11. № 3. P. 3010. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b08668>
54. *Kapitanova O.O., Emelin E.V., Dorofeev S.G. et al.* // *J. Mater. Sci. Technol.* 2020. V. 38. P. 237. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.07.042>
55. *Wang W., Panin G.N., Fu X. et al.* // *Sci Rep.* 2016. V. 6. P. 31224. <https://doi.org/10.1038/srep31224>
56. *Panin G.N.* // *Chaos, Solitons Fractals.* 2021. V. 142. P. 110523. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110523>
57. *Choi C., Choi M.K., Liu S. et al.* // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01824-6>
58. *Amani M., Lien D.H., Kiriya D. et al.* // *Science.* 2015. V. 350. № 6264. P. 1065. <https://doi.org/10.1126/science.aad2114>
59. *Akinwande D., Petrone N., Hone J.* // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. <https://doi.org/10.1038/ncomms6678>
60. *Lee G.H., Yu Y.J., Cui X. et al.* // *ACS Nano.* 2013. V. 7. № 9. P. 7931. <https://doi.org/10.1021/nn402954e>
61. *Ling Z.P., Yang R., Chai J.W. et al.* // *Opt. Express.* 2015. V. 23. № 10. P. 13580. <https://doi.org/10.1364/oe.23.013580>
62. *Zhang W., Huang J.K., Chen C.H. et al.* // *Adv. Mater.* 2013. V. 25. № 25. P. 3456. <https://doi.org/10.1002/adma.201301244>

63. *Chang H.Y., Yang S., Lee J. et al.* // ACS Nano. 2013. V. 7. № 6. P. 5446.
<https://doi.org/10.1021/nn401429w>
64. *Yin Z., Li H., Li H. et al.* // ACS Nano. 2012. V. 6. № 1. P. 74.
<https://doi.org/10.1021/nn2024557>
65. *Lopez-Sanchez O., Lembke D., Kayci M. et al.* // Nat. Nanotechnol. 2013. V. 8. № 7. P. 497.
<https://doi.org/10.1038/nnano.2013.100>
66. *Maya-Vetencourt J.F., Ghezzi D., Antognazza M.R. et al.* // Nat. Mater. 2017. V. 16. № 6. P. 681.
<https://doi.org/10.1038/nmat4874>
67. *Mandel Y., Goetz G., Lavinsky D. et al.* // Nat. Commun. 2013. V. 4. № 1. P. 1980.
<https://doi.org/10.1038/ncomms2980>
68. *Canales A., Jia X., Froriep U.P. et al.* // Nat. Biotechnol. 2015. V. 33. № 3. P. 277.
<https://doi.org/10.1038/nbt.3093>
69. *Khodagholy D., Rivnay J., Sessolo M. et al.* // Nat. Commun. 2013. V. 4. № 1. P. 2133.
<https://doi.org/10.1038/ncomms3133>
70. *Kim J., Lee M., Shim H.J. et al.* // Nat. Commun. 2014. V. 5. № 1. P. 5747.
<https://doi.org/10.1038/ncomms6747>
71. *Cheng Z., Ríos C., Pernice W.H.P. et al.* // Sci. Adv. 2017. V. 3. № 9. P. e1700160.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700160>