

# Квантовая фотосенсорика на основе двумерных структур\*

В.С. Попов, В.П. Пономаренко, С.В. Попов

Описаны устройство и основные параметры фотосенсорных структур на основе квазидвумерных слоев из элементов IV, V, VI и VIII групп Периодической таблицы Д.И. Менделеева, таких как: восстановленный оксид графена (rGO), теллурид олова (SnTe), теллурид висмута ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), селенид платины ( $\text{PtSe}_2$ ), материал на основе азотзамещенного графена ( $\text{C}_3\text{N}$ ). Впервые синтезированы новые фоточувствительные элементы на основе массивов произвольно ориентированных 2D-нанослоев  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и восстановленного оксида графена, гетероструктур из композиционных двумерных наночастиц SnTe/rGO, гетероструктур rGO/(SnTe+rGO) и rGO/ $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . На синтезированных элементах без охлаждения реализована фоточувствительность в различных областях электромагнитного излучения. На основе rGO и 2D- $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  изготовлены полевые фототранзисторы, в которых впервые обнаружены эффекты зависимости формы кривых  $I_{\text{ds}}(V_{\text{g}})$  от засветки различными источниками излучения, что открывает перспективы создания фотосенсоров с управляемой напряжением спектральной чувствительностью.

**Ключевые слова:** 2D-кристаллы, графен, дихалькогениды, нанокристалл, гетероструктура, фоточувствительность.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-29-20080).

## Введение

Отличительной чертой последних десятилетий является стремительный рост фундаментальных и прикладных исследований, направленных на создание фотосенсоров с применением материалов и структур ограниченной размерности. Таковыми могут быть структуры на основе графена, графеноподобных и родственных 2D-наноматериалов, “неграфеновых” 2D-материалов из элементов IV, V, VI, IIIa, VIa и других групп таблицы Д.И. Менделеева, наноразмерных слоев топологических изоляторов типа теллурида висмута и др. Успешно развивается фотосенсорика на основе композиционных сверхрешеток II типа (T2SL – Type-II SuperLattice), представляющих собой чередующиеся наноразмерные слои полупроводников с разной шириной запрещенной зоны (InAsSb/InSb, InGaAs/GaAsSb, InAs/GaSb, PbTe/pBs, PbTe/SnTe). Свойства многих из T2SL структур позволяют избежать ряда недостатков, присущих твердотельной полу-

проводниковой фотосенсорике на основе объемных 3D-монокристаллов и эпитаксиальных слоев, например, повысить рабочую температуру сенсоров благодаря существенно меньшим темновым токам.

Работы по улучшению фотоприемников во многом ограничиваются физическими свойствами, накладываемыми уже используемыми и широко известными чувствительными материалами. Поиск и развитие новых фоточувствительных материалов и структур открывают широкие перспективы для развития фотосенсорики. На интенсивные исследования фотосенсорных свойств слоистых и двумерных 2D-материалов и структур начали обращать внимание не только коллективы из университетов и исследовательских академических институтов, но также и исследовательские центры высокотехнологичных производственных компаний.

В настоящее время наибольшее внимание исследователей привлечено к изучению возможностей наноструктурирования материалов и использованию 0D-, 1D- и 2D-наноматериалов и структур на их основе в фотосенсорике, особенно инфракрасного диапазона спектра. За годы, прошедшие с момента экспериментального открытия двумерной аллотропной модификации углерода (графена), было получено несколько сотен двумерных материалов на основе моноатомных, бинарных и тройных соединений из элементов Периодической системы Д.И. Менделеева. Наиболее изученными из моноатомных двумерных материалов являются



**ПОПОВ**  
**Виктор Сергеевич**  
Государственный научный  
центр Российской Федерации  
АО «НПО «Орион»



**ПОНОМАРЕНКО**  
**Владимир Павлович**  
профессор,  
Государственный научный  
центр Российской Федерации  
АО «НПО «Орион»



**ПОПОВ**  
**Сергей Викторович**  
АО «Швабе»

ся графен и родственные графену материалы. Однако значительные успехи достигнуты и для материалов на основе других двумерных наноструктур из монокристаллических материалов, в частности, силицена, антимонена, висмутена, теллурина и др. [1]. Описанию свойств различных двумерных материалов и их применению в наноэлектронике посвящены обзоры [2, 3]. Обзор, посвященный квазиульмерной фотосенсорике, опубликован в работе [4]. Согласно опубликованным в литературе расчетам и практическим результатам, фоточувствительные материалы ограниченной размерности открывают возможности создания нового класса фотоприёмных устройств на ближний, средний и дальний ИК-диапазоны спектра (в том числе неохлаждаемых) устройств с перестраиваемой спектральной чувствительностью, а также фоточувствительных элементов на гибких подложках.

В большинстве случаев фоточувствительные элементы современных устройств 3D-фотосенсорике ИК-диапазона имеют архитектуру фоторезисторов, фотодиодов или фототранзисторов [5]. ПЗС- и ПЗИ-структуры используются значительно реже. Те же принципы используются при создании фоточувствительных элементов из материалов ограниченной размерности. В низкоразмерных материалах ловушки и разупорядоченность оказывают заметное влияние на их электронные свойства вследствие малого количества атомов и размеров одиночных наночастиц, меньших длины свободного пробега электрона. Такое влияние должно существенно сказаться и на подходах к конструированию фотосенсоров и, в том числе, подходах к проведению измерений их характеристик. Хотя ключевые характеристики 3D-фотосенсоров, такие как мощность, эквивалентная шуму (NEP), соотношение сигнал-шум (SNR), удельная обнаружительная способность ( $D^*$ ) и чувствительность (R) применяются и для фотосенсоров на основе 2D-наноструктур, однако такие параметры, как спектр шума, интенсивность регистрируемого излучения и фона, зависимость чувствительности от частоты модуляции требуют большего внимания при проведении измерений во избежание значительных завышений, в частности, значений  $D^*$ . Рост числа публикаций с необычно высокими значениями  $D^*$  привел к необходимости дополнительного уточнения методик измерения характеристик фотосенсоров на основе 2D-материалов [6].

Особые перспективы связываются с разработкой неохлаждаемых фотосенсоров на основе гибридных Ван-дер-Ваальсовых гетероструктур на 2D-материалах в сочетании с 0D-, 1D- и 3D-материалами [7], а также с плазмонными концентраторами в составе фотоактивного слоя для усиления оптического поглощения [8].

В большинстве опубликованных работ по фотосенсорике на основе структур ограниченной размерности исследуются фотосенсоры, изготовленные на одиноч-

ных малоразмерных фрагментах выбранного 2D-материала с размерами  $10 \times (50 \div 100)$  мкм<sup>2</sup>, имеющих вид нанопластинок неправильной формы (рис. 1).

Перспектива использования таких структур в промышленности не выглядит очевидной, так как в случае ИК-излучения коротковолнового (1.0–2.0 мкм), среднего (3–5 мкм) и тем более длинноволнового (8–12 мкм) диапазонов линейный размер чувствительных элементов для эффективного поглощения должен составлять не менее 4, 10, 25 мкм соответственно. Альтернативой является использование не одиночных фрагментов 2D-материалов, а их массивов, не ориентированных латерально и синтезированных на подобранных подложках. При этом подходе свойства материала принципиально отличаются как от массивных поликристаллических материалов, так и от одиночных малоразмерных фрагментов.

В настоящей работе были получены и исследованы образцы в виде массивов произвольно ориентированных двумерных фрагментов теллурида висмута, восстановленного оксида графена, гетероструктур из композиционных двумерных наночастиц SnTe/rGO, гетероструктур rGO/SnTe/rGO и rGO/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> с целью получения новых типов неохлаждаемых

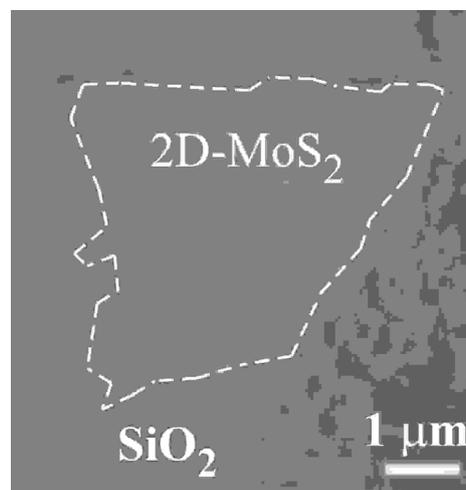


Рис. 1. Одиночный малоразмерный фрагмент двумерного дисульфида молибдена ( $2D-MoS_2$ ) в виде пластинки неправильной формы на поверхности подложки из окисленного кремния ( $SiO_2$ ). Изображение получено с помощью оптического микроскопа [11].

фотосенсорных устройств. По литературным данным, структуры с использованием 2D-слоев восстановленного оксида графена (rGO), халькогенидов платины, олова и висмута, азотзамещенного графена ( $C_3N$ ) были изучены недостаточно. Например, для теллурида висмута в литературе описываются лишь структуры на основе отдельных индивидуальных наночастиц: нанопроволок  $Bi_2Te_3$  [9] или нанопластинок  $Bi_2Te_3$  [10]. Гетероструктуры из композиционных двумерных наночастиц SnTe/rGO, гетероструктур rGO/SnTe/rGO и rGO/ $Bi_2Te_3$  известны не были.

Для характеристики состава, строения и оптических свойств исследованных 2D-материалов и структур использовались атомно-силовая (AFM) и сканирующая (SEM) микроскопия, энергодисперсионный микроанализ (EDX), рентгенофазовый анализ (RFA), рамановская и ИК-Фурье спектроскопия.

### Синтез массивов 2D-материалов

#### Наноструктуры на основе 2D- $Bi_2Te_3$

Нами предложен и экспериментально реализован метод, позволяющий получать тонкие пластинки теллурида висмута с толщинами, приближающимися к предельно малым без использования дорогостоящего оборудования, высоких температур, дорогостоящих или токсичных дисперсионных сред. Двумерные наночастицы  $Bi_2Te_3$  имеют структуру тонких листов, расположенных стопкой вдоль плоскости (006). В перпендикулярном направлении листы, по-видимому, не сохраняют ориентацию решетки объемного материала.

Анализ слоистого строения теллурида висмута показал, что в отличие от графита  $Bi_2Te_3$  состоит из повторяющихся блоков по пять слоев атомов в последовательности Te(1)–Bi–Te(2)–Bi–Te(1), а связь между блоками осуществляется Ван-дер-Ваальсовыми силами. Кроме того, связь Bi–Te(1) сильнее Bi–Te(2). При этом оказывается, что связь Bi–Te(2), несмотря на ковалентный характер, имеет энергию, ненамного превышающую связи Te(1)–Te(1) соседних блоков. Толщина блока, состоящего из пяти атомных слоев, лежит в пределах 1–1.5 нм, что указывает на принципиальную возможность расслаивания объемного теллурида висмута до таких предельно малых толщин. Наличие слабых связей позволяет ожидать достижения этих предельных толщин при сравнительно малом подводе энергии. Процесс диспергирования проводился в изопропиловом спирте без использования сложных диспергирующих агентов при температуре 30–45 °С. Подобранные температурные режимы позволили получить дисперсии теллурида висмута, устойчивые в течение десятков часов, с использованием простой лабораторной ультразвуковой ванны. Для формирования фоточувствительных элементов использовался метод drop-casting с нанесением на подложку со встречно-штыревыми контактами при температуре 45 °С. После каждого цикла нанесения образец высушивался в течение 1 минуты при 45 °С, затем выполнялся следующий цикл нанесения. В итоге были получены образцы фоторезисторов после 28, 140 и 180 циклов нанесения суспензии (рис. 2). После завершения процесса нанесения, полученные образцы окончательно высушивались в течение 4 часов при температуре 70 °С.

Исследование спектра поглощения частиц показало, что максимум поглощения суспензии 2D- $Bi_2Te_3$  расположен вблизи  $\lambda \approx 3.2$  мкм, то есть в области 3–5 мкм среднего окна прозрачности земной атмосферы (рис. 2с).

Атомно-силовая микроскопия на сканирующем зондовом микроскопе Ntegra Maximus, проведенная для высушенных капель суспензии, перенесенной на поверхность пластины полированного кремния, показала, что суспензия состоит из отдельных пластинок  $Bi_2Te_3$  со средним размером 200–300 нм и толщиной 2–2.5 нм (рис. 3).

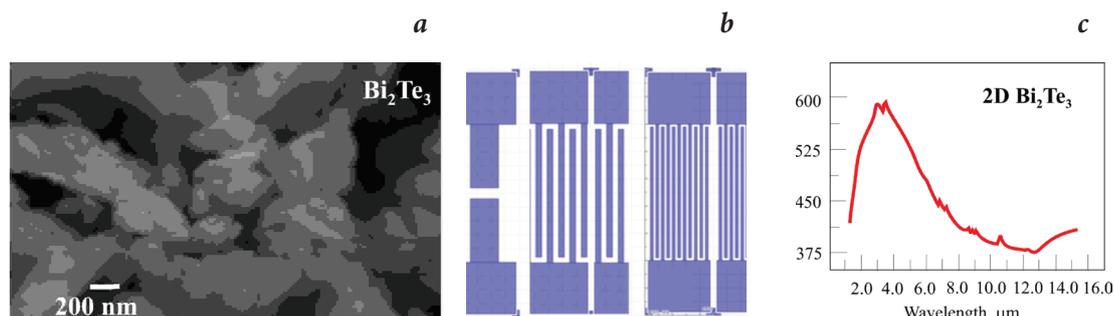


Рис. 2. а – Сканирующая электронная микроскопия образца фоторезистора на основе  $Bi_2Te_3$  после 140 циклов нанесения; б – встречно-штыревые контакты; в – ИК-спектр поглощения суспензии 2D- $Bi_2Te_3$  после диспергирования.

Спектральные характеристики двумерных материалов на основе теллурида висмута возможно варьировать за счет изменения условий получения суспензий, в частности, за счет изменения состава диспергирующего агента. При исследованиях в качестве дисперсионных сред были выбраны этанол, бензиловый спирт, бутанол-1, бутанол-2, изоамиловый спирт, изопропанол, трет-бутанол, трифторэтанол и диметил формамид. Варьирование способа диспергирования осуществлялось путем использования двух диспергаторов: погружного (20 кГц, выходная мощность 50–60 Вт) и ультразвуковой ванны (35 кГц, выходная мощность 10 Вт). Время и мощность варьировались для получения устойчивых суспензий. Для контроля отличий в свойствах получаемых материалов использовался метод ИК-спектроскопии тонких слоев, нанесенных

из суспензий. Спектры пропускания (рис. 4) записывали на ИК-Фурье спектрометре Perkin-Elmer Spectrum 100 с приставкой многократного нарушенного полного внутреннего отражения с кристаллом селенида цинка ZnSe. Изучение оптических свойств полученных слоев позволило экспериментально подтвердить зависимость спектра поглощения от условий получения слоев наночастиц теллурида висмута.

### Наноструктуры на основе 2D SnTe/rGO

Предварительно суспензия восстановленного оксида графена наносилась методом spin-coating на поверхность подложки со встречно-штыревыми электродами при скорости 1500 об/мин и последовательно просушивалась после каждого нанесения. Затем подготовленная дисперсия наночастиц 2D-SnTe в изопропиловом спирте методом drop-casting наносилась на поверхность подложки с rGO. Спектр оптического поглощения и фотография поверхности SnTe/rGO, полученная методом сканирующей электронной микроскопии, представлены на рисунке 5.

В спектральных зависимостях оптического поглощения структур SnTe/rGO наблюдаются области интенсивного поглощения в диапазоне 2–4 мкм с максимумом на длине волны  $\lambda \approx 3$  мкм и в диапазоне 4–12 мкм, где расположено третье окно прозрачности земной атмосферы (рис. 5b).

### Фотопроводимость в структурах на основе массивов двумерных rGO, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> и SnTe/rGO

Рамановская спектроскопия пленки SnTe на поверхности rGO с использованием излучения полупроводникового лазера с длиной волны 532 нм и мощностью 10 мВт, обнаружившая наличие пиков на длинах волн 1 350 см<sup>-1</sup> (D) и 1 590 см<sup>-1</sup> (G) и пиков и пиков на длинах волн 2 680 см<sup>-1</sup>, 2 940 см<sup>-1</sup> и 3 190 см<sup>-1</sup> (2D), подтвердила, что на поверхности образцов сформировано покрытие, включающее ультра-

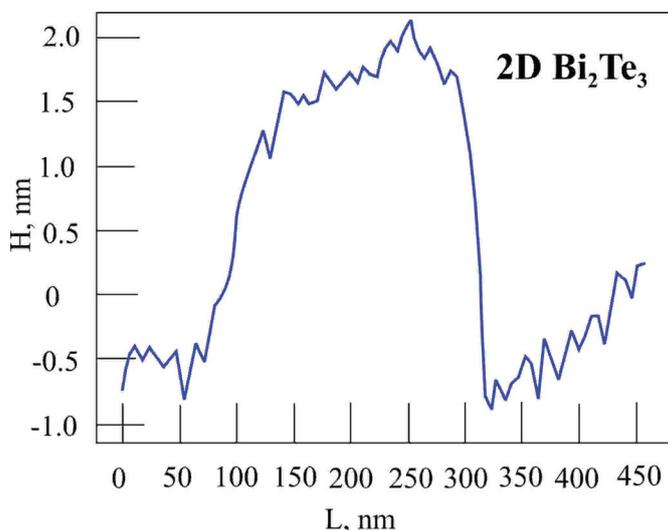


Рис. 3. Профиль высот отдельной пластинки 2D-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, полученный с помощью атомно-силовой микроскопии [17].

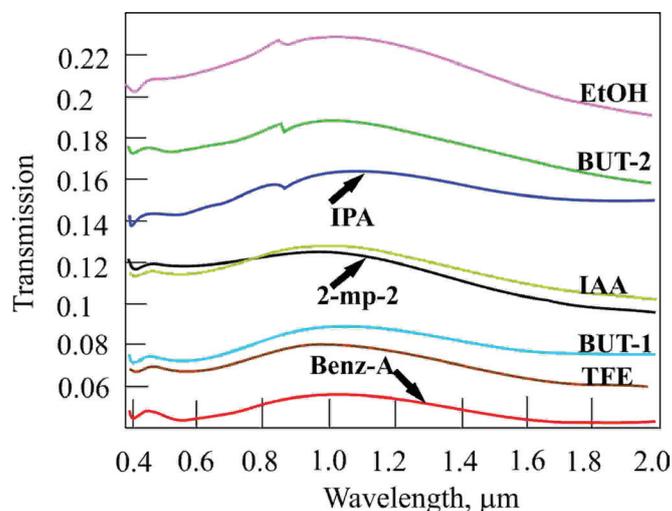


Рис. 4. Спектры пропускания покрытий на стекле, полученных методом spin-coating из суспензий 2D-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> на основе различных дисперсионных сред: EtOH, BUT-2, IPA, IAA, 2-mp-2, BUT-1, TFE, Benz-A.

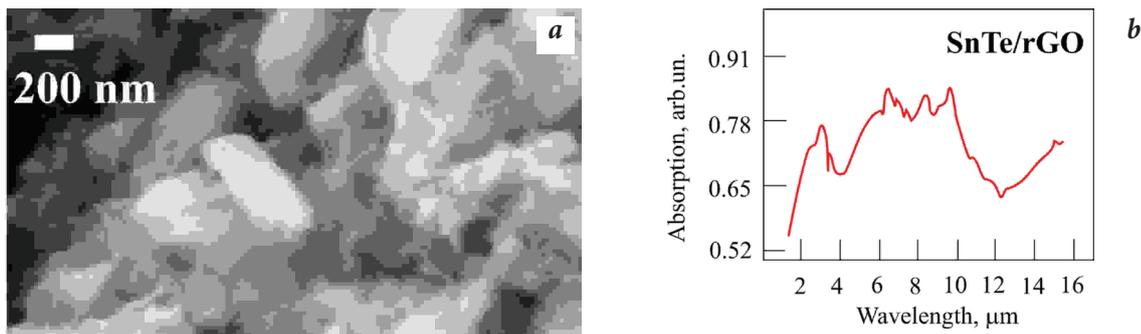


Рис. 5. а – Сканирующая электронная микроскопия образца фоторезистора на основе SnTe/rGO после 45 циклов нанесения суспензии SnTe; б – ИК-спектр поглощения.

тонкую нанокристаллическую пленку теллурида олова и восстановленный оксид графена. Результаты сканирующей электронной микроскопии свидетельствовали, что покрытия целиком закрывают подложку и представляют собой произвольно ориентированные 2D-пластинки теллурида олова и деформированные листы восстановленного оксида графена.

Аналогичные исследования проводились для образцов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , нанесенных на поверхность подложки из оксида алюминия. Сканирующая электронная микроскопия образцов показывает, что на всех образцах на поверхности подложки формируется рыхлое покрытие из пластинок теллурида висмута, ориентированных произвольным образом и целиком закрывающее подложку. При росте числа циклов нанесения меняется только толщина материала. Спектры комбинационного рассеяния в целом соответствуют теллуриду висмута. Данные энергодисперсионного и рентгенофазового анализа указывают, что основным материалом покрытий являются двумерные наночастицы теллурида висмута, возможно, содержащие на поверхности монослои оксида.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) описанных образцов представлены на рисунке 6. Для теллурида висмута ВАХ в диапазоне напряжений 0–5 В в целом имеют линейный характер, при больших напряжениях на ВАХ наблюдается нелинейность, характерная для образцов теллурида висмута, полученных методом эксфолиации [12]. В целом, для темновых ВАХ у всех

образцов при комнатной температуре и температуре жидкого азота наблюдается ожидаемое увеличение сопротивления при охлаждении. При засветке лазером (650 нм) никаких изменений в ВАХ у образцов не происходит. При засветке образцов модельным АЧТ (2 800 К) наблюдается изменение в ВАХ у образцов, изготовленных при 140 и 180 циклах нанесения, при этом максимальный фототок, вычисленный по разнице между темновым током и током при засветке, зарегистрирован для образца, изготовленного при 180 циклах нанесения при комнатной температуре. Отметим, что при меньшем количестве циклов при комнатной температуре наблюдается меньший фототок.

Синтезированные новые фоточувствительные элементы на основе массивов произвольно ориентированных 2D-нанослоев  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и двумерных гетероструктур SnTe/rGO демонстрируют фотоотклик как при температуре жидкого азота, так и при комнатной температуре.

Для образцов теллурида висмута, полученных эпитаксиальным методом, как правило, в области температур 50–100 К наблюдается повышение проводимости и, соответственно, повышение фототока при засветке по мере снижения температуры [13]. На образцах, полученных в данной работе, напротив, повышение фототока воспроизводимо наблюдается при повышении температуры.

#### Фототранзисторы с проводящим каналом на основе 2D-материалов

Использование исследуемых 2D-материалов и структур в качестве проводящих сред в каналах полевых транзисторов (FET) позволяет получить дополнительные сведения о процессах переноса носителей зарядов, обусловленных ограниченной размерностью.

Выбор архитектуры FET для этих целей проводился с учетом особенностей технологии синтеза двумерного материала и на основании обзоров устройства и свойств двумерных нано- и фототранзисторов, выполненных при поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-20080 [3, 5].

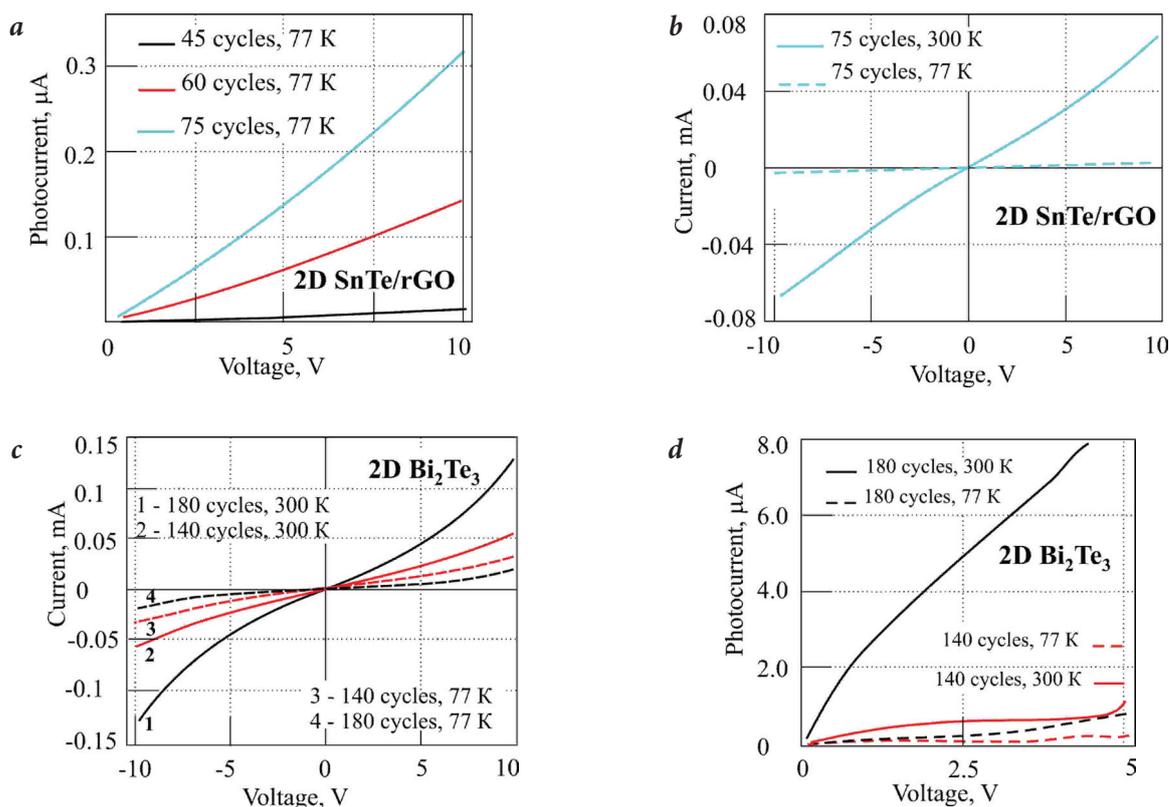


Рис. 6. Зависимости тока в отсутствие освещения и фототока в образцах с архитектурой 2D-SnTe/rGO и 2D-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> при T=77 K и T=300 K; на графиках указано число циклов осаждения теллурида олова и теллурида висмута: а – при засветке от АЧТ (2800 K); б – без освещения (темновой режим); в – без освещения (темновой режим); д – при засветке от АЧТ (2800 K) [17].

Структурно полевые транзисторы на основе двумерных 2D-материалов не отличаются от таковых на основе обычных объемных 3D-материалов. В общем виде их структуру можно представить в виде плоского конденсатора, между обкладками которого (верхний и нижний полевые электроды) в диэлектрической среде располагается слой 2D-материала, являющийся токопроводящим каналом (рис. 7). Обкладки играют роль затвора, управляющего проводимостью канала.

Основные типы полевых транзисторов с использованием графена и графеноподобных структур и материалов, описанные в работах [3, 5], представлены на рисунке 8.

Для наших исследований наиболее удобным оказалась архитектура с нижним полевым электродом, показанная на рисунках 8а, g, h, i. Металлические электроды в такой структуре изготавливаются до этапа синтеза двумерных материалов проводящего канала методом магнетронного нанесения золота Au (100 нм) с подслоем титана Ti (20 нм). Было проведено исследование структур на основе массивов двумерных rGO, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, SnTe/rGO, rGO/(SnTe+rGO) и Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/rGO, используемых в качестве материалов канала FET (рис. 9). Слои суспензии восстановленного оксида графена наносили методом spin-coating при скорости 1500 об/мин, последовательно просушивая после каждого нанесения. Слои суспензии наночастиц

теллурида висмута и композиционных наночастиц теллурида олова на поверхности восстановленного оксида графена наносили при скорости 2000 об/мин, последовательно просушивая после каждого нанесения. После окончания всех циклов нанесения все образцы окончательно высушивались в течение 4 часов при 60 °С. Важно отметить, что во всех изготовленных гетероструктурах контакт золотых электродов был только с поверхностью восстановленного оксида графена, а двумерные теллуриды (2D-SnTe и 2D-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) играли

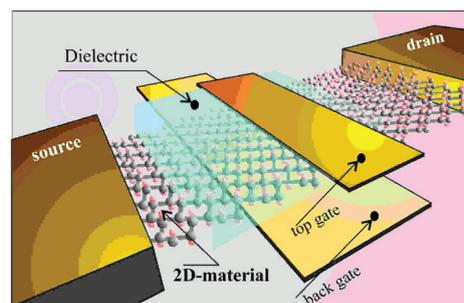
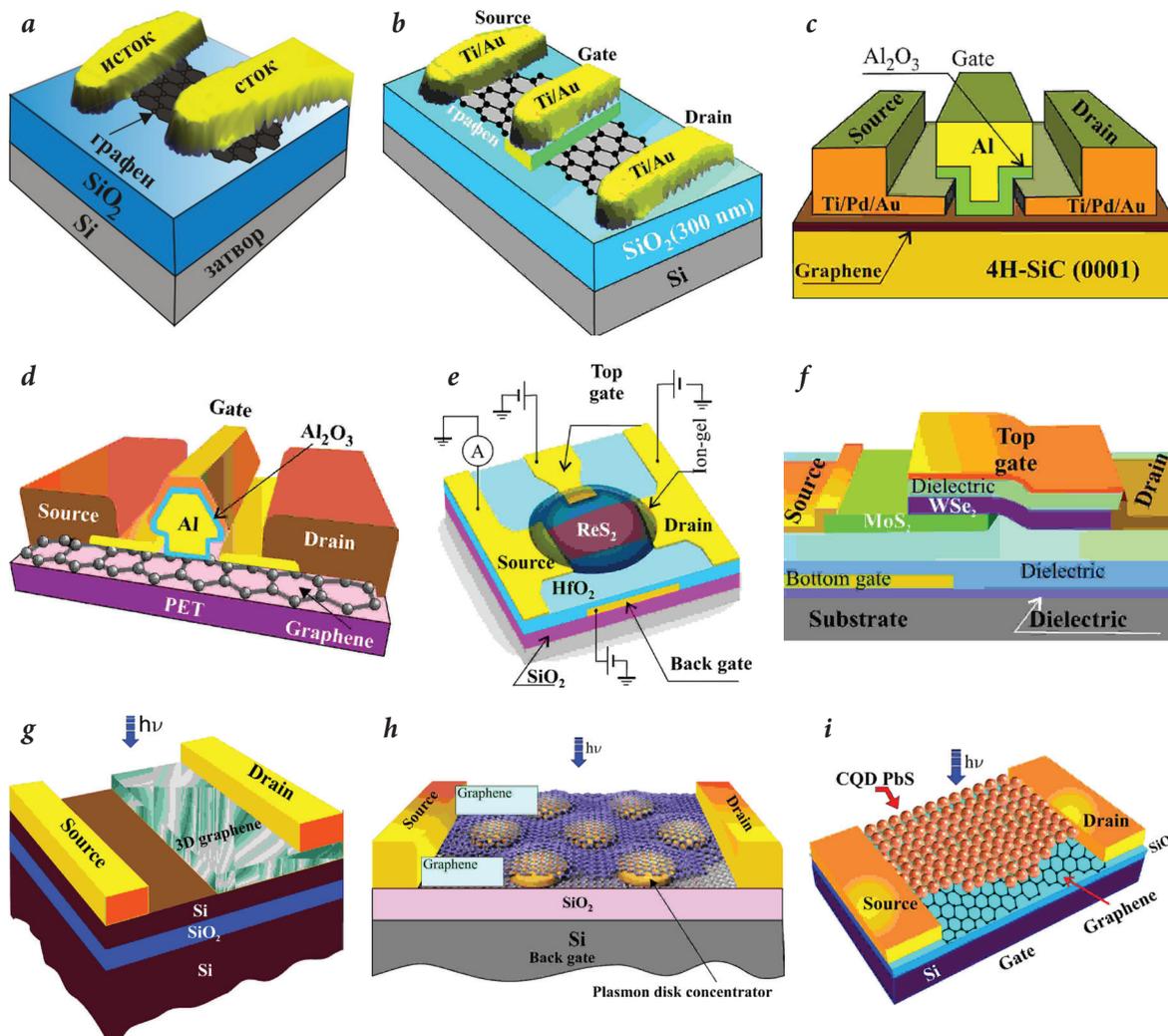


Рис. 7. Обобщенная структура полевого (FET) транзистора с изолированным затвором на основе 2D-материала [3].



**Рис. 8.** Архитектуры полевых транзисторов на основе структур и материалов ограниченной размерности [3, 5]: а – первый полевой транзистор на основе графена (GFET) с нижним полевым электродом; б – FET на основе графена с верхним полевым электродом с диоксидом кремния в качестве подзатворного диэлектрика; в – высокочастотный FET на основе графена с подложкой из 4H-SiC; д – FET на основе графена на гибкой подложке из полиэтилентерефталата; е – FET на основе ReS<sub>2</sub> с полевым затвором из полимера; ф – туннельный транзистор с вертикальной гетеропарой WSe<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub> (VH-TFET); г – FET на основе гетероструктуры Si/3D-графен; h – фототранзисторы с плазмонными дисковыми концентраторами, расположенными между слоями графена [3]; i – FET на основе графена, декорированного квантовыми точками PbS [3].

роль «декорирующих» слоев в гетероструктурах.

Исследование фотооткликов транзисторной структуры на основе восстановленного оксида графена (rGO) показало увеличение тока при засветке от абсолютно черного тела с температурой, соответствующей излучению средневолнового ИК-диапазона, по сравнению с темновым током. При засветке лампой видимого диапазона и лазерами коротковолнового ИК-диапазона, напротив, наблюдается снижение тока относительного темнового (рис. 10а).

Более сложный характер зависимости тока от напряжения на затворе

демонстрирует образец фототранзистора на основе 2D-частиц теллурида висмута.

Темновой ток в диапазоне напряжений на затворе 5.5–6.0 В меняет знак, симбатно ему ведет себя ток при засветке от лампы видимого диапазона и лазера 1 310 нм, при этом при одинаковых значениях напряжения на затворе в диапазоне от 2 до 5.5 В ток при засветке от обоих источников превышает темновой ток. В диапазоне напряжений на затворе от 6 до 10 В, напротив, значения темнового тока по абсолютному значению превышают значения тока засветки от лампы видимого диапазона и лазера 1 310 нм (рис. 10б).

Существенные отличия наблюдаются для тока при засветке от абсолютно черного тела с температурой, соответствующей излучению средневолнового ИК-диапазона, и лазера 1 550 нм во всем диапазоне напряжений

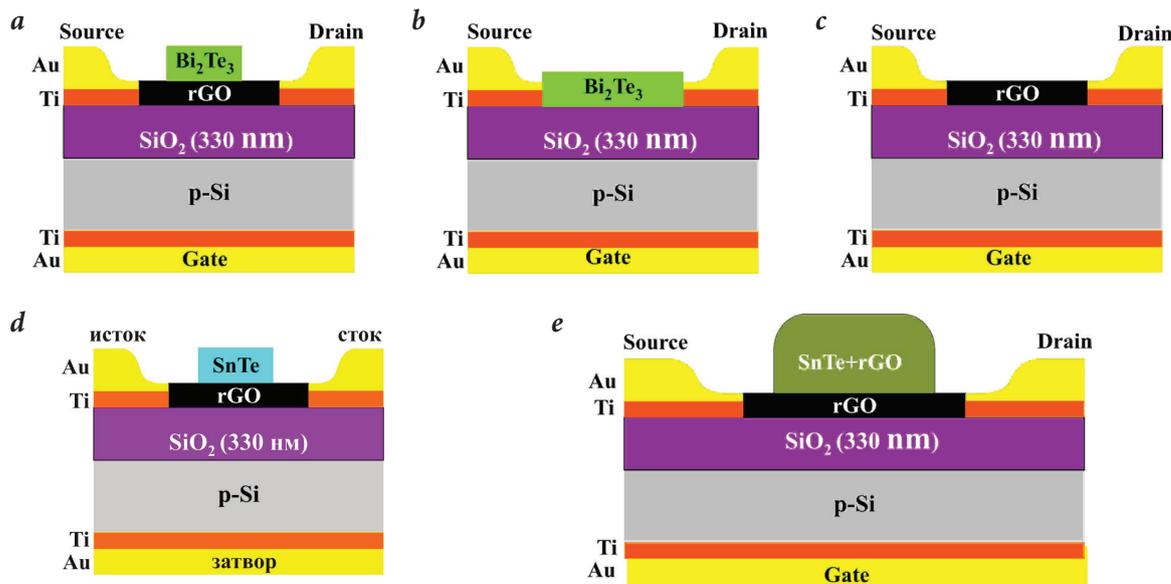


Рис. 9. Архитектуры FET с проводящим каналом на основе массивов двумерных частиц: а – rGO/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>; б – Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>; в – rGO; д – rGO/SnTe; е – rGO/(rGO+SnTe) [16].

на затворе от 2 до 10 В, где он существенно выше темнового тока (рис. 10б).

В случае гетероструктуры на основе rGO/2D-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> зависимости фототока от напряжения на затворе существенно отличаются от таковых для фототранзисторов на индивидуальных материалах на основе восстановленного оксида графена и 2D-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. При засветке лампой видимого диапазона, лазерами коротковолнового ИК-диапазона и засветке от абсолютно черного тела с температурой, соответствующей излучению средневолнового ИК-диапазона, по сравнению с темновым током наблюдается увеличение тока засветки относительного темнового тока во всём диапазоне напряжений на затворе от -10 до 10 В (рис. 10с).

Описанные выше существенные отличия в поведении изготовленных структур требуют дальнейшего более подробного изучения, вместе с тем наблюдаемые эффекты дают принципиальную возможность создания нового типа фотоприемных устройств с управляемой спектраль-

ной чувствительностью для применения в технике ИК-видения.

Поиск новых двумерных материалов, потенциально пригодных для детектирования ИК излучения, по-прежнему остается важной задачей ИК-фотосенсорики. Последнее время всё большее внимание исследователей привлекают халькогениды благородных металлов и производные графена и графеноподобных материалов.

### Оптическое поглощение диселенида платины (PtSe<sub>2</sub>) и азотзамещенного графена (C<sub>3</sub>N)

В 2017 г. была обнаружена фоточувствительность PtSe<sub>2</sub> к ИК-излучению в области длин волн 3–5 мкм. Не-

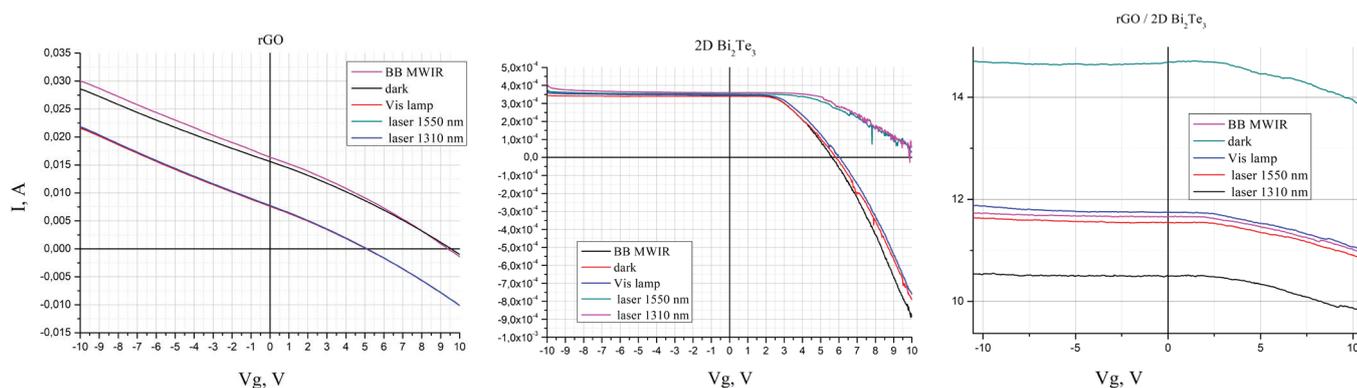


Рис. 10. Зависимости фототока в фототранзисторе с проводящим каналом из различных 2D-материалов. Цвет кривых соответствует типу источника засветки [16].

смотря на приведенные в литературе данные о подвижности носителей и о ширине запрещенной зоны бислоя селенида платины, а также экспериментально отмеченного повышения фототока при засветке излучением вплоть до 10 мкм, в литературе пока отсутствуют расчетные и экспериментальные зависимости спектров поглощения для монослоев селенида платины 2D-PtSe<sub>2</sub>. Нами был выполнен расчет спектра поглощения отдельного монослоя PtSe<sub>2</sub> с использованием метода Хартри – Фока с тремя поправками Гримма (HF-3с). Расчет выполнен с помощью программного средства Orca (ver. 4.2.1). Моделирование 2D-слоя PtSe<sub>2</sub> проводилось с использованием программного средства Visualization for Electronic and Structural Analysis (VESTA). В качестве исходной элементарной ячейки использовались параметры  $a, b=3.761 \text{ \AA}, c=6.118 \text{ \AA}; \alpha, \beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$ . На расчетном спектре (рис. 11) наблюдается значительная область поглощения оптического излучения в области 9–11 мкм, что соответствует области роста фототока, наблюдаемого в работе [15]. Таким образом, полученные расчетные результаты в целом коррелируют с ранее описанными в литературе функциональными свойствами.

Расчет спектральной зависимости поглощения для C<sub>3</sub>N также выполнялся методом HF-3с с использованием программных средств Orca (ver. 4.2.1) и VESTA. В качестве исходной элементарной ячейки использовались параметры  $a, b, c=5.363 \text{ \AA}; \alpha=143.652^\circ, \beta=100.802^\circ, \gamma=90.409^\circ$ .

На расчетном спектре (рис. 12) видно значительное поглощение оптического излучения в области длин волн 5–10 мкм, что открывает возможность создания фотоприемника на этом двумерном материале для среднего и длинноволнового ИК-диапазонов электромагнитного излучения.

### Заключение

В работе продемонстрированы перспективы применения квазидвумерных слоев из элементов IV, V, VI и VIII

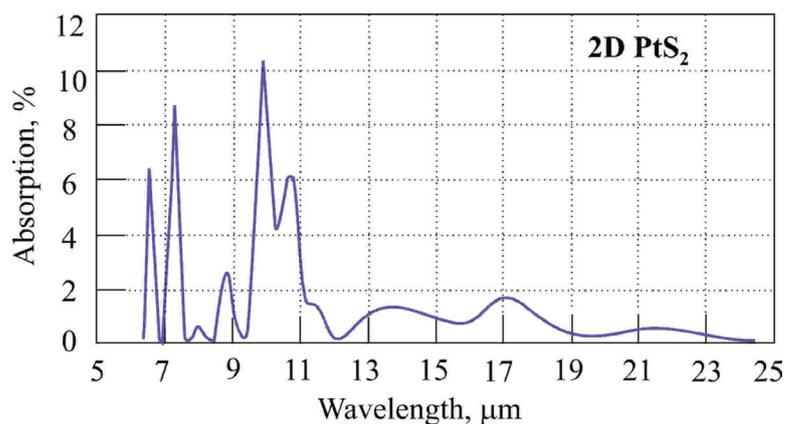


Рис. 11. Рассчитанный спектр поглощения монослоя 2D-PtSe<sub>2</sub>.

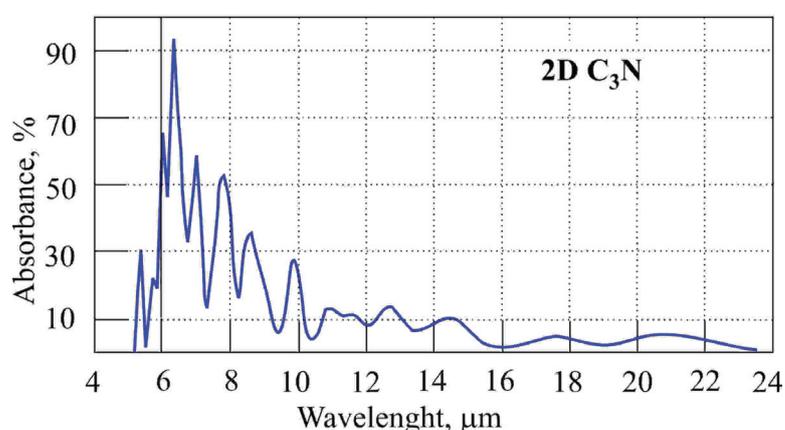


Рис. 12. Рассчитанный спектр поглощения монослоя 2D-C<sub>3</sub>N.

групп Периодической таблицы Д.И. Менделеева, таких как восстановленный оксид графена (rGO), теллурид олова (SnTe), теллурид висмута (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>), селенид платины (PtSe<sub>2</sub>), материал на основе азот-замещенного графена (C<sub>3</sub>N), для создания фотосенсоров видимого и коротковолнового ИК-диапазона спектра, работающие при комнатной температуре.

Впервые синтезированы новые фоточувствительные элементы на основе массивов произвольно ориентированных 2D-нанослоев Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> и восстановленного оксида графена, гетероструктур из композиционных двумерных наночастиц SnTe/rGO, гетероструктур rGO/(SnTe+rGO) и rGO/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, проявляющие при T=300 К фоточувствительность как по отношению к абсолютно черному телу с температурой, соответствующей излучению средневолнового ИК-диапазона, так и по отношению к засветке от лазерного источника видимого света.

Предложенный технологический подход не требует высоковакуумного эпитаксиального оборудования и отличается относительной простотой процесса получения суспензий и получения фотосенсорных слоев, дает возможность в будущем изготавливать дешевые широкоспектральные фотосенсоры.



Images & Tables

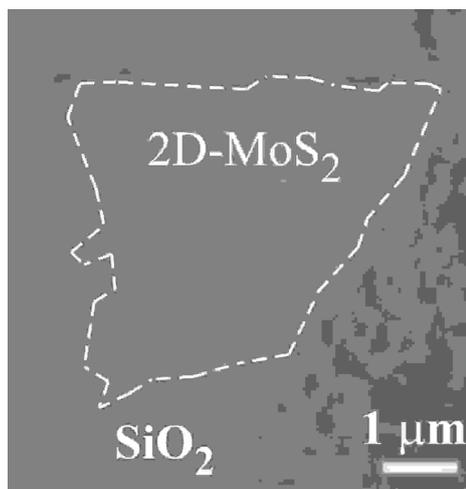


Fig. 1. Single 2D-MoS<sub>2</sub> on SiO<sub>2</sub> substrate [11].

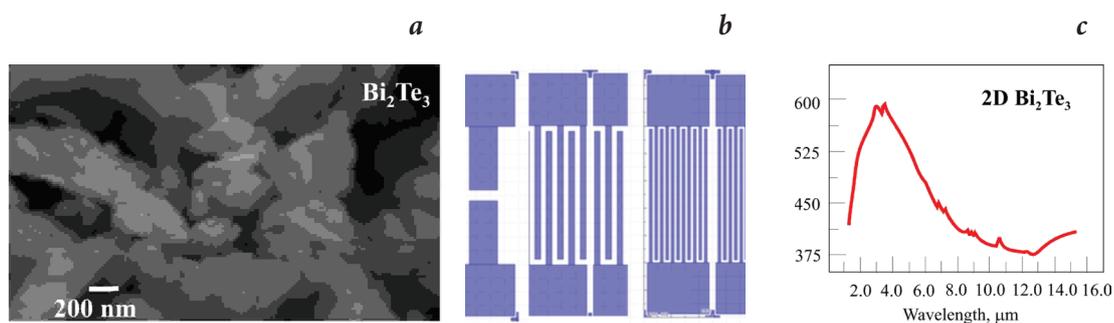


Fig. 2. a – SEM of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> based photoresistor (140 cycles of deposition); b – interdigitated electrodes; c – IR absorbance of 2D-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> after exfoliation.

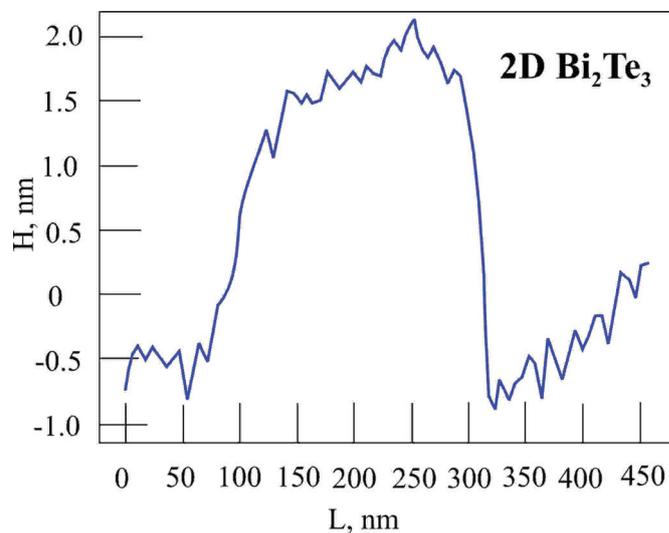


Fig. 3. AFM of single 2D-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> nanoparticles [17].

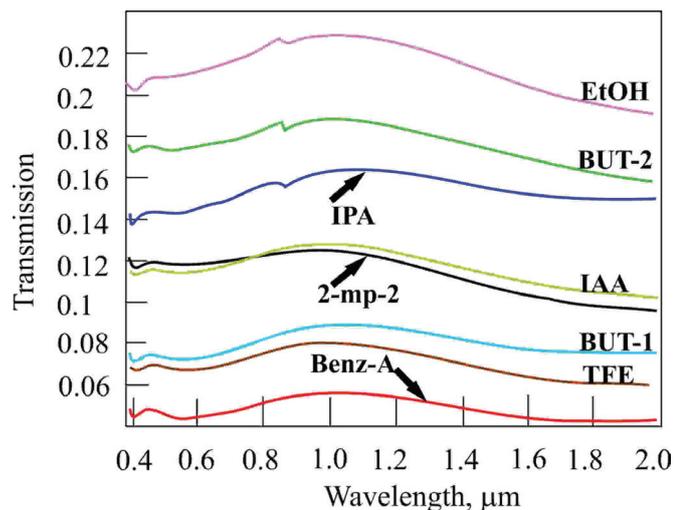


Fig. 4. IR transmission spectrums of 2D-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> layers spin-coated on glass substrate using different organic solvents: EtOH, BUT-2, IPA, IAA, 2-mp-2, BUT-1, TFE, Benz-A

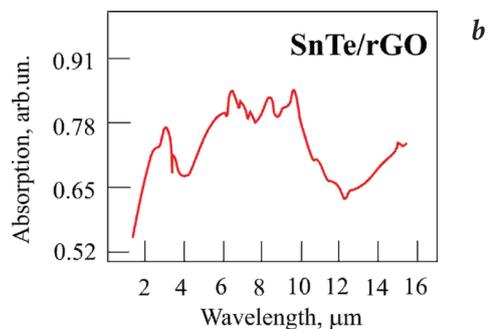
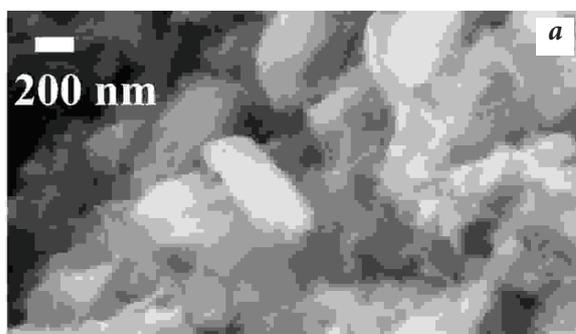


Fig. 5. a – SEM of SnTe/rGO based photoresistor (45 cycles of deposition); b – IR absorbance.

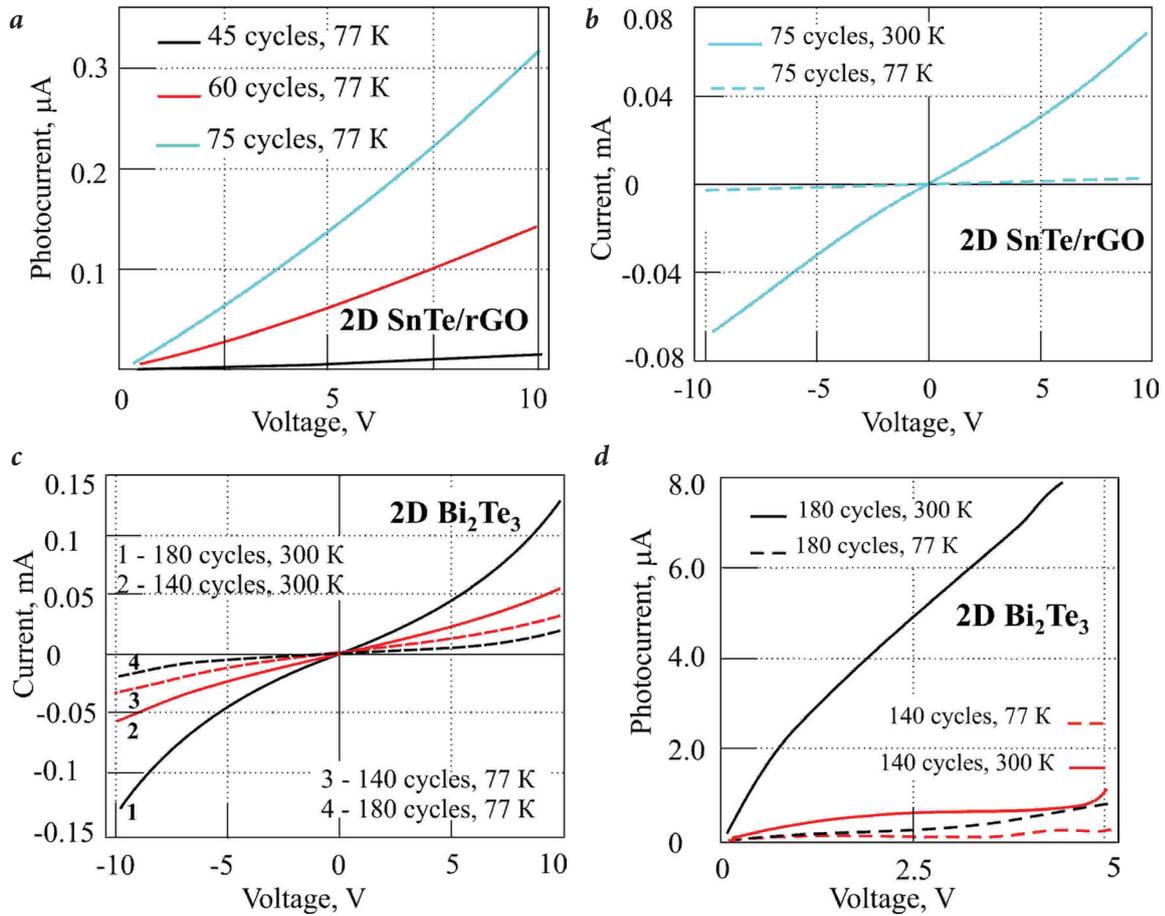


Fig. 6. Current vs voltage of 2D-SnTe/rGO u 2D-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> photosensors at T=77 K and T=300 K; numbers of deposition cycles shown on fig.: a – under BB radiation (2 800 K); b – dark; c – dark; d – under BB radiation (2 800 K) [17].

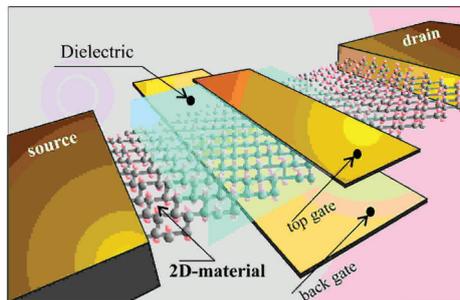


Fig. 7. Field-effect transistor (FET) based on 2D materials [3].

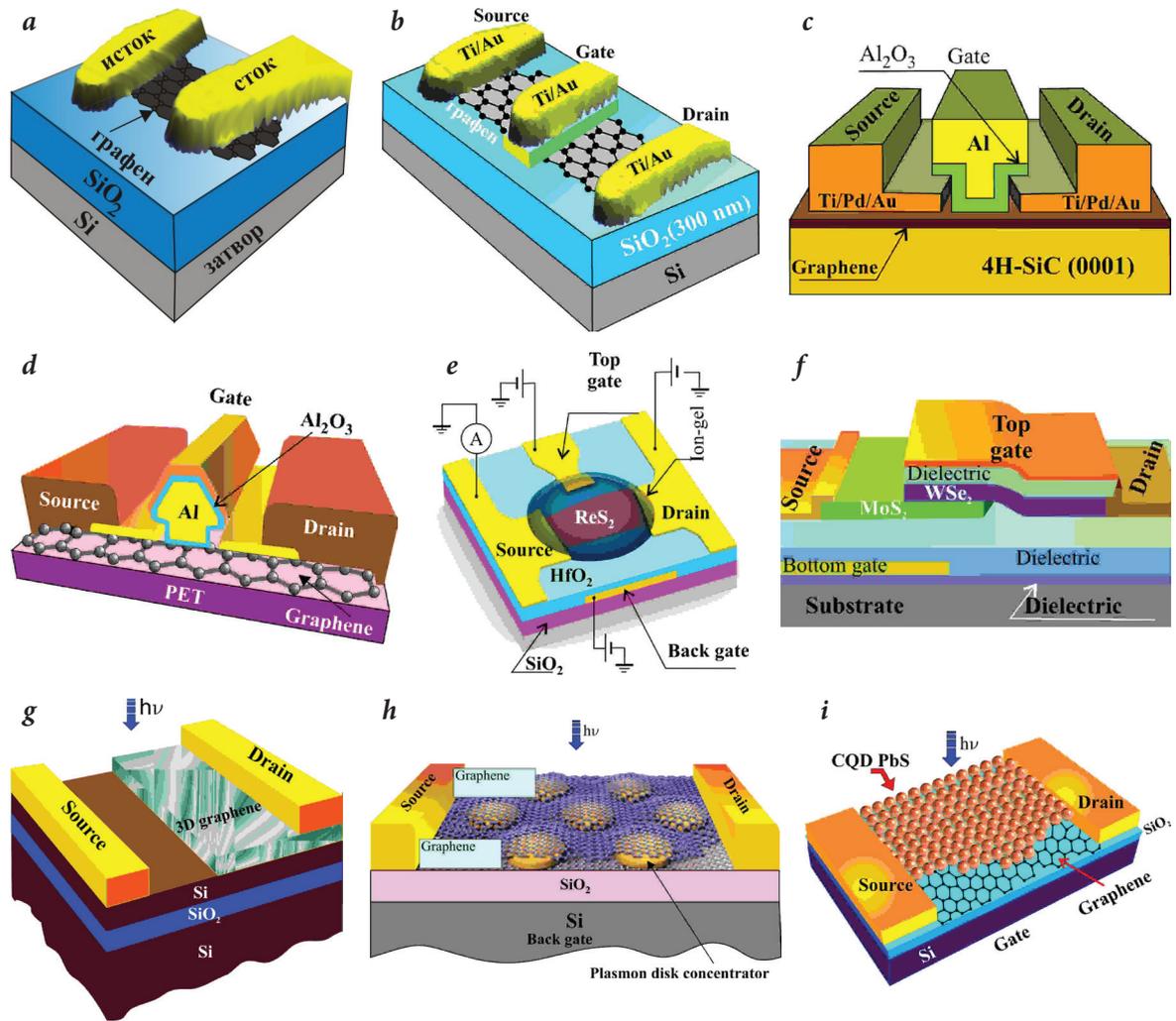


Fig. 8. FET structures [3, 5].

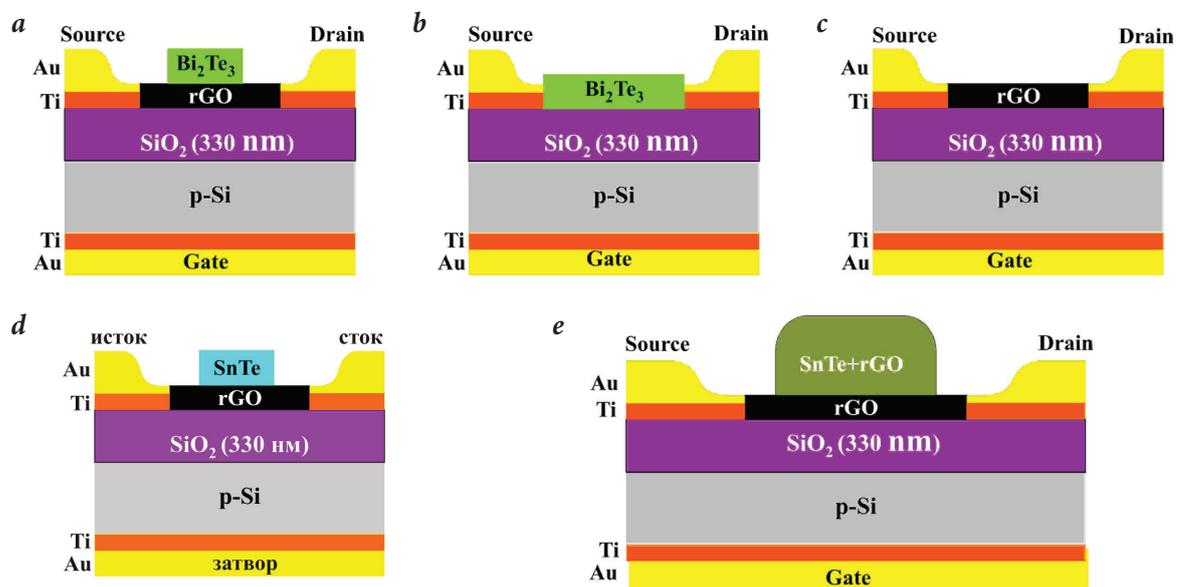


Fig. 9. FET structures based on 2D materials: a - rGO/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>; b - Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>; c - rGO; d - rGO/SnTe; e - rGO/(rGO+SnTe) [16].

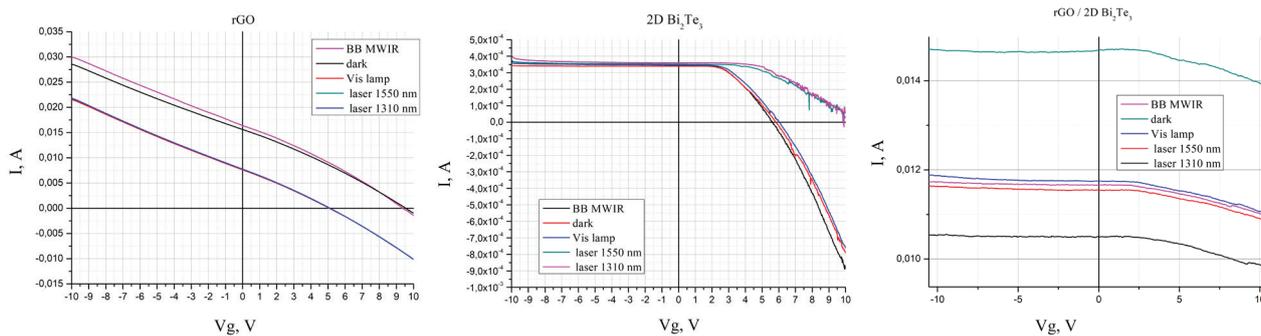


Fig. 10. Photocurrent vs gate voltage based on designed 2D materials [16].

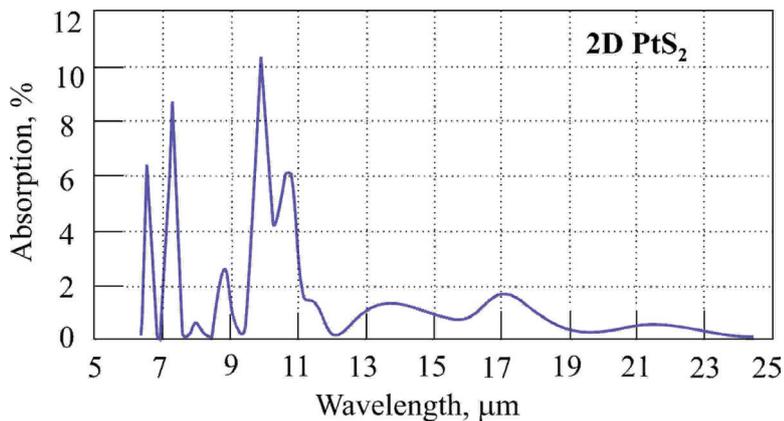


Fig. 11. Absorption spectrum of 2D- $\text{PtSe}_2$  monolayer.

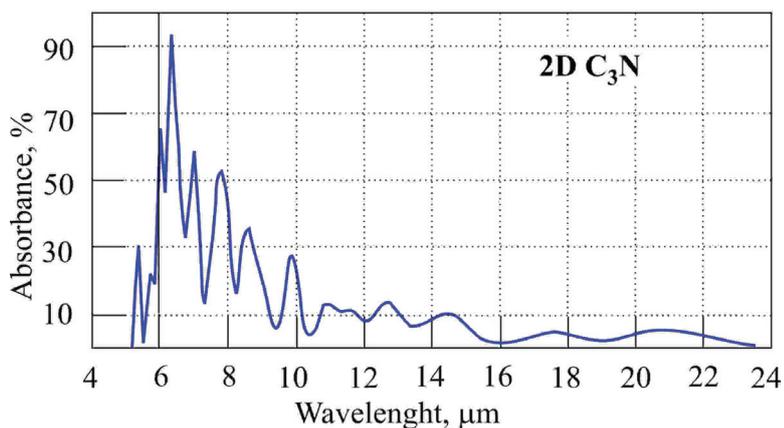


Fig. 12. Absorption spectrum of 2D- $\text{C}_3\text{N}$  monolayer.

## References

1. T.R. Glavin, R. Rao, V. Varshney, E. Bianco, A. Apte, A. Roy, E. Ringe, P.M. Ajayan. *Adv. Mater.*, 2020, **32**(7), 1904302. DOI: 10.1002/adma.201904302.
2. V.P. Ponomarenko, V.S. Popov, S.V. Popov, E.L. Chepurnov. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2020, **65**(9), 1062. DOI: 10.1134/S1064226920090090.
3. V.P. Ponomarenko, V.S. Popov, S.V. Popov. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2022, **67**(9), 1134. DOI:10.1134/S1064226922090121.
4. V.P. Ponomarenko, V.S. Popov, S.V. Popov. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2022, **67**(Suppl. 1), S1. DOI: 10.1134/S106422692213006X.
5. V.S. Popov, V.P. Ponomarenko, S.V. Popov. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2022, **67**(9), 1152. DOI: 10.1134/S1064226922090133.
6. Y. Fang, A. Armin, P. Meredith, J. Huang. *Nat. Photonics*, 2019, **13**(1), 1. DOI: 10.1038/s41566-018-0288-z.
7. K.S. Novoselov, A. Mishchenko, A. Carvalho, A.H. Castro Neto. *Science*, 2016, **353**, 6298. DOI: 10.1126/science.aac9439.
8. Q. Guo, C. Li, B. Deng, S. Yuan, F. Guinea, F. Xia. *ACS Photonics*, 2017, **4**, 2989. DOI: 10.1021/acsp Photonics.7b00547.
9. D. Park, K. Jeong, I. Maeng, D. Kim, H. Kwon, S.-B. Hong, J.-H. Kim, C.-S. Kee, C. Kang, M.-H. Cho. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, **7**(7), 1900621. DOI: 10.1002/adom.201900621.
10. J.L. Liu, H. Wang, X. Li, H. Chen, Z.K. Zhang, W.W. Pan, G.Q. Luo, C.L. Yuan, Y.L. Ren, W. Lei. *J. Alloy. Compd.*, 2019, **798**, 656. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.05.299.
11. L.A. Chernozatonskii, A.A. Artyukh. *Physics-Usppekhi*, 2018, **61**(1), 2. DOI: 10.3367/UFNe.2017.02.038065.
12. D. Teweldebrhan, V. Goyal, A.A. Balandin. *Nano Lett.*, 2010, **10**, 1209. DOI: 10.1021/nl903590b.
13. T.-T. Kang, P.-P. Chen. *J. Appl. Phys.*, 2019, **126**, 083103. DOI: 10.1063/1.5099026.
14. C.-H. Yeh, Z.-Y. Liang, Y.-C. Lin, T.-L. Wu, T. Fan, Y.-C. Chu, C.-H. Ma, Y.-C. Liu, Y.-H. Chu, K. Suenaga, P.-W. Chiu. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, **9**, 36181. DOI: 10.1021/acscami.7b10892.
15. X. Yu, P. Yu, D. Wu, B. Singh, Q. Zeng, J. Lin, K. Suenaga, Z. Liu, Q.J. Wang. *Nat. Commun.*, 2018, **9**, 1545. DOI: 10.1038/s41467-018-03935-0.
16. O.A. Saptsova, N.A. Lavrentiev, V.A. Malygin, E.V. Mirofyanchenko, A.E. Mirofyanchenko, V.P. Ponomarenko, V.S. Popov. *Applied Physics*, 2023, №1 (in print).
17. V.S. Popov, A.V. Egorov, V.P. Ponomarenko. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2021, **66**(9), 1092. DOI: 10.1134/S106422692109014X.