ФОТОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621 PACS: 81.07.-b, 81.10.-h

Фото- и наноэлектроника на основе двумерных 2D-материалов (обзор)

(Часть II. 2D-нанотранзисторы)

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

Описаны устройство и основные параметры полевых транзисторов (FETs) на основе 2D-материалов, таких как графен (Gr) и его производные, графеновые наноленты (GNR), ди- и трихалькогениды переходных металлов MoS_2, $MoSe_2$, $MoTe_2$, WS_2, WSe_2, $Mo_{1-x}W_xSe_2$, ZrS_2, $ZrSe_2$, HfS_2, $HfSe_2$, PtS_2, $PtSe_2$, $PtTe_2$, $PdSe_2$, ReS_2, $ReSe_2$, HfS_3, ZrS_3, TiS_3, $TaSe_3$, NbS_3, фосфорен (bP), антимонен (2DSb), арсенен (2DAs), силицен (2DSi), германен (2DGe), станен (2DSn). Рассмотрены конструкции полевых нанотранзисторов на гибких подложках, туннельных (TFET), одноэлектронных (SET), транзисторов, содержащих 2D-гетеропары Gr-(h)BN, Gr-WS_2, Gr-(h)BC_2N, Gr-FGr, SnS_2-WS_2, $SnSe_2$-WSe_2, HfS_2-MoS_2, $PdSe_2$-MoS_2, WSe_2-WO_{3-x}.

Ключевые слова: 2D-наноструктура, гетероструктура, нанотранзистор, одноэлектронный, туннельный, ди- и трихалькогениды, графен, фосфорен, силицен.

Ссылка: *Пономаренко В. П., Попов В. С., Попов С. В.* // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 1. С. 33.
Reference: V. P. Ponomarenko, V. S. Popov, and S. V. Popov, Usp. Prikl. Fiz. **8** (1), 33 (2020).

1. Введение

В 1947 году был изобретен биполярный транзистор на основе германия (W. Shockley, W. Brattein, J. Bardeen), ознаменовавший начало первой научно-технической революции в микроэлектронике. Элементной базой твердотельной электроники конца XX столетия стали полупроводниковые структуры с *p–n* гомопереходами, с *P–n*, *N–p*, *P–p*, *n–N* гетеропереходами, с гомо- и гетеропереходами на основе *p–i–n*-структур, многочисленные типы транзисторов, диоды Шоттки, инжекционные диоды, бариодные гетеросистемы XBn_n и XB_np с блокирующими барьерами, BIB-структуры, и т. п. [1]. Их функционирование определяется упорядоченными полупроводниковыми, металлическими и диэлектрическими фрагментами с размерами от 1 микрометра до, примерно, 100 нанометров. Одновременно с элементной базой была развита и материаловедческая база по синтезу основных полупроводниковых материалов, таких как кремний (Si) и германий (Ge), бинарные и тройные соединения SiC и Si_xGe_{1-x}, GaAs, InP, GaP, AlN, GaN и InN, $Ga_xIn_{1-x}As$, $Al_xGa_{1-x}As$, $InAs_{1-x}Sb_x$ и др. Параметры микроэлектронных приборов и устройств на основе объемных монокристаллов и эпитаксиальных слоев этих полупроводников фактически достигли теоретического предела.

Пономаренко Владимир Павлович[1,2], главный конструктор, зав. кафедрой, д.ф.-м.н., профессор.
Попов Виктор Сергеевич[1], нач. специального конструкторско-технологического центра, к.х.н.
Попов Сергей Викторович[3], зам. ген. директора, д.т.н., доцент.
[1] АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).
Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.
[3] АО «Швабе».
Россия, 129366, Москва, Проспект Мира, 176.

Статья поступила в редакцию 17 января 2020 г.

© Пономаренко В. П., Попов В. С., Попов С. В., 2020

При переходе от объемного макроскопического полупроводникового кристалла к некому образованию из тех же самых атомов, но с характерными размерами порядка нескольких сотен частиц, радикально изменяется его энергетическая структура. Идея создания искусственных периодических структур с новыми многообещающими и, на первый взгляд, парадоксальными свойствами была высказана в 1962 году в СССР академиком Л. В. Келдышем, предложившим использовать пространственно-периодические поля для управления электронным спектром (Келдыш Л. В. – ФТТ, т. 4, № 8, 1962, с. 2265). На основе этой идеи в конце прошлого столетия получила развитие квантовая наноинженерия, оперирующая с полупроводниковыми фрагментами, характерные размеры которых сравнимы с де-Бройлевской длиной волны электрона, такими как квантовые ямы, квантовые нити, квантовые точки, сверхрешетки различных типов, nipi-кристаллы и т. п. Размеры фрагментов устройств на основе таких размерно-квантованных наноструктур лежат в пределах от 100 до 1 нанометра. Основу материаловедческой базы для их изготовления составили многие из вышеописанных моноатомных, бинарных и тройных соединений.

Развитие новых материалов и нанотехнологий привело к переосмыслению роли наноструктур в наноэлектронике будущего. Изобретение А. Геймом и К. Новоселовым, ставшими в 2010 году Нобелевскими лауреатами, способа превращения трехмерного графита в двумерные 2D-кристаллы графена толщиной всего в один атомный слой открыло новую страницу в развитии твердотельной наноэлектроники. Функционирование приборов на основе двумерных 2D-наноструктур определяется упорядоченными фрагментами с толщиной, определяемой величиной постоянной решетки вещества (доли нанометра). Число двумерных 2D-материалов на сегодняшний день уже не ограничивается сотнями и это число стремительно растет. Среди бурно развивающихся областей нанотехнологий на основе 2D-материалов в литературе все чаще упоминаются информационные и вычислительные системы, телекоммуникационные, авиационные, космические и оборонные приложения, клиническая и медицинская диагностика, имплантация живых органов, нанохимия и катализ и многие другие [2–10].

Состояние развития наноэлектроники с использованием 2D-материалов нуждается в регулярном анализе и описании. В первой части статьи нами был проведен обзор основных методов синтеза, кристаллографических параметров и строения энергетических зон ряда открытых в последнее время двумерных и квазидвумерных 2D-материалов [11]. Настоящая часть статьи посвящена методам изготовления и свойствам нанотранзсторов на их основе.

2. Транзисторы на основе двумерных 2D-материалов

Подавляющее большинство цифровых и аналоговых микросхем современной микроэлектроники базируется на полевых МДП- или МОП-транзисторах.

Транзисторы для первых микропроцессоров Pentium (1993 г.) были изготовлены на кремнии с использованием технологического процесса с проектной нормой 800 нм, затем 600 нм. Уже в 1995 году для процессоров шестого поколения начал использоваться процесс с проектной нормой 350 нм, в 1997 году проектная норма снизилась до 250 нм, а в 1999 году до 180 нм. В 2004 году была введена норма 90 нм. Переход к новому техпроцессу обеспечил бóльшую частоту переключения, меньшие токи утечки и позволил создавать транзисторы меньших размеров. Одновременно это привело к уменьшению площади кристалла, а значит, снизило тепловыделения. В 2000-х годах гонка по сокращению размеров отдельных элементов процессоров (прежде всего затворов полевых транзисторов) продолжилась. В 2006 году был освоен технологический процесс с проектной нормой 65 нм (Intel Pentium 4). К 2009–2010 годам проектная норма снизилась до 28 нм. В 2008 году была выпущена микросхема, содержащая 2 млрд транзисторов. В 2011 году этот рубеж был преодолен и фирмой «Altera» была выпущена микросхема, состоящая из 3,9 млрд транзисторов. В апреле 2015 года компания «Intel» начала продажи 14-нм процессоров Celeron N3000, N3150 Pentium и N3700 [12]. В конце 2018 года этой же фирмой были пред-

ставлены процессоры девятого поколения Coffee Lake-S, изготовленные по расширенной версии процесса с проектной нормой 14 нм (его часто обозначают, как техпроцесс с проектной нормой 14^{+++} нм) [13]. Тогда же компанией Intel были представлены процессоры Sanny Cove, изготовленные по 10нм-процессу. Крупнейший в мире кремниевый завод TSMC начал производство интегральных схем по 10нм-процессу еще в 2016 году и быстро перешел на 7нм-процесс. Использование технологического процесса с проектной нормой 10 нм позволил добиться 2,7-кратного увеличения плотности транзисторов по сравнению с 14нм-техпроцессом и разместить на кристалле площадью 127 мм^2 около 12,8 млрд транзисторов.

Согласно прогнозу из «Международной маршрутной карты развития приборов и систем» («International Roadmap for Devices and Systems», IRDS) уровень топологических норм в производстве программируемых логических микросхем к 2024 году достигнет 3–4 нм, а к 2030 году 1,5–2 нм. Геометрическая длина затвора МОП-транзистора с высокой потребляемой мощностью при 14нм-техпроцессе составляет 24 нм, при 10нм-техпроцессе – 18 нм, при 7нм-техпроцессе – 14 нм, а при 1,5нм-техпроцессе она составит всего 10 нм. Столь малые размеры элементов стимулируют поиск новых ультратонких материалов для изготовления транзисторов. Поскольку главными требованиями, предъявляемыми к транзисторам, являются быстродействие и низкое энергопотребление, то помимо нанометровой толщины, материалы для них должны обладать максимально высокой подвижностью носителей заряда. Решение проблемы отвода тепла при работе СБИС требует, чтобы эти материалы имели максимально высокую теплопроводность. В прогнозах IRDS также упоминается перспектива внедрения новых полупроводниковых материалов с более высокой, чем в кремнии подвижностью носителей заряда, приборов на новых физических принципах, таких как квантовые кубиты, нейроморфные системы и др.

Многие двумерные материалы с толщиной в один атомный слой по своим структурным и электрофизическим параметрам близки к вышеперечисленным требованиям. Подвижность носителей зарядов в свободно подвешенных слоях графена при комнатной температуре достигает 2×10^5 см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$ и составляет $1{,}5\times10^4$ см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$ для графена на SiO_2-подложках. Теплопроводность графена существенно выше, чем у кремния и составляет $(4–5)\times10^3$ Вт$\cdot$м$^{-1}\cdot$К$^{-1}$. Близкими свойствами обладает ряд синтезированных в последнее время двумерных 2D-материалов. Слои большинства из них можно обрабатывать методами литографии. Немаловажным достоинством двумерных материалов, особенно углеродных, является их доступность и сравнительно низкая цена. Все это стимулировало многочисленные исследования по созданию полевых транзисторов на основе двумерных 2D-материалов.

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. 1). Обкладки играют роль затвора, управляющего проводимостью канала.

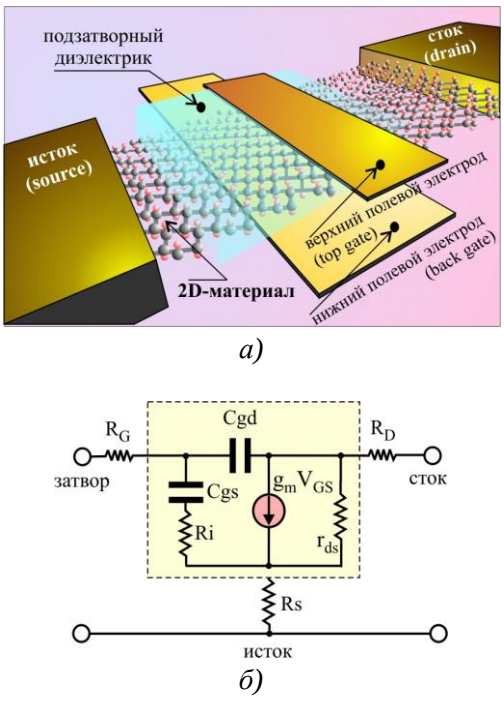


Рис. 1. а) – обобщенная структура полевого (FET) транзистора с изолированным затвором на основе 2D-материала (в качестве примера здесь выбран 2D-графан, серый цвет – атомы углерода, красный цвет – атомы водорода); б) – типичная эквивалентная схема транзистора [14].

2.1 Транзисторы на основе графена и его производных

Эффект поля в графене был исследован в 2004 году, когда авторами работы [15] был изготовлен первый графеновый полевой транзистор (GFET) на подложке из сильно легированного кремния, покрытого слоем SiO_2 толщиной d ~ 300 нм, который служил подзатворным диэлектриком (рис. 2). Графеновый слой был изготовлен методом микромеханического расслоения высокоориентированного пиролитического графита. Управляющее напряжение подавалось на сильно легированную кремниевую подложку, сыгравшую роль электрода затвора. Несмотря на отсутствие запрещенной зоны, атомарно тонкий графен активно отзывается на воздействие электрического поля – его сопротивление может увеличиваться в несколько раз при подаче смещения Vg. Такая FET-структура отличалась простотой и удобством для проведения экспериментов, но из-за большой емкости «паразитного» конденсатора, образованного подложкой и затвором, была сравнительно низкочастотной.

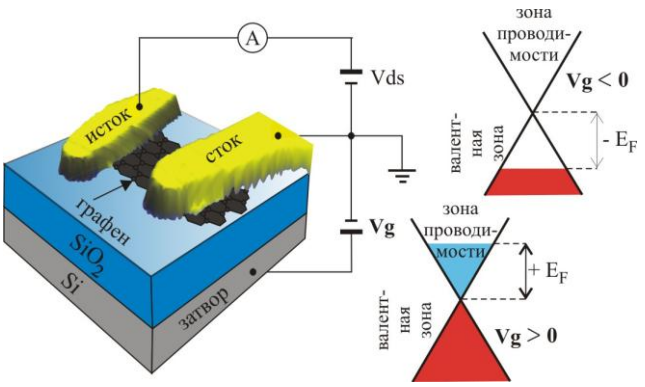


Рис. 2. Схематический вид первого полевого транзистора на основе графена (GFET) с нижним полевым электродом. Подложка служит электродом для подачи управляющего напряжения [15].

В 2007 году в Германии был изготовлен первый полевой транзистор с верхним полевым электродом (рис. 3). Разработка была проведена совместно сотрудниками Центра перспективной микроэлектроники (Advanced Microelectronic Centre Aachen, AMICA, Germany) и Института полупроводниковой электроники (Institute of Semiconductor Electronics, RWTH Aachen University, Germany). Подложкой служил сильно легированный бором кремний *p*-типа ($N_A = 10^{15}$ см$^{-3}$), поверхность которого покрывалась диоксидом кремния (SiO_2) толщиной 300 нм. После нанесения на диоксид кремния слоя графена ($t_G = 1{,}5$ нм), полученного микромеханическим расслоением высокоориентированного графита в соответствии с методом, описанным в работе [15], с применением электронно-лучевой литографии изготавливались затвор с подзатворным диэлектриком из SiO_2 толщиной 20 нм и электроды стока-истока (Ti/Au). Подвижности носителей в графене до покрытия подзатворным SiO_2 составила $\mu_h = 4790$ см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$ и $\mu_e = 4780$ см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$, а после покрытия 710 см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$ и 530 см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$, соответственно. В работе [17] в схеме с верхним полевым электродом (Si, $\rho = 0{,}01$ Ом·см) в качестве подзатворного диэлектрика использовался HfO_2 с толщиной $d_{ox} = 15$ нм (рис. 4, *а*).

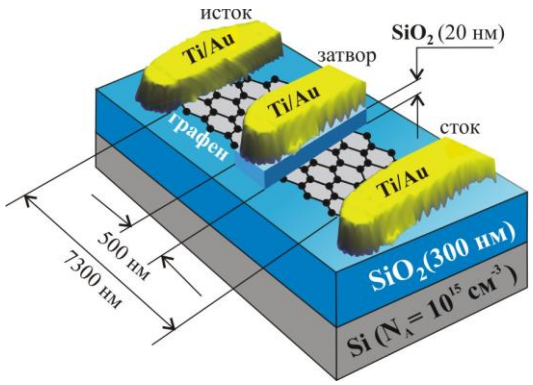


Рис. 3. Первый полевой транзистор на основе графена с верхним полевым электродом и диоксидом кремния в качестве подзатворного диэлектрика [16].

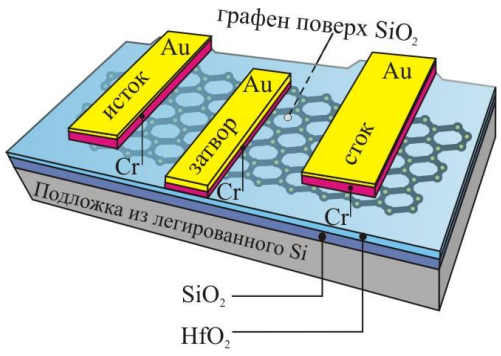
В работе [18] с применением HfO_2 был изготовлен графеновый транзистор с расщепленным полевым электродом (рис. 4, *б*). В работе [19] применялся нитрид бора (h-BN, теплопроводность ~ 6÷7 Вт·см$^{-1}\cdot$град$^{-1}$ для объемных кристаллов) толщиной 8,5 нм, поверх которого наносился графен. Близость кристаллических решеток, отсутствие центров рассеяния и минимальная волнистость поверхности сверхтонкой подложки из h-BN и графенового слоя обеспечили высокую подвижность носителей в графеновом канале полевого транзистора $\mu_h \cong 1{,}1\times10^4$ см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$, $\mu_e \cong 8{,}6\times10^3$ см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$. Были исследованы также графеновые транзисторы с использованием подложек из карбида кремния (SiC), со схемой показанной на рис. 4, *в*, где была реализована подвижность в

канале порядка 5×10^3 см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$ [20]. Вследствие парадокса Клейна [21], в бесщелевом графене всегда присутствует удельная проводимость $\sigma = \frac{2e^2}{h} k_F l$ (l – среднее значение свободного пробега носителей зарядов), минимальное значение которой составляет величину $\sigma_{min} \sim e^2/h$. Это приводит к большим токам утечки в цепи стока транзистора в состоянии «закрыто» и малым значениям отношения $I_{d,ON}/I_{d,OFF}$ (отношение ON/OFF). Последнее обстоятельство препятствует использованию полевых транзисторов на основе бесщелевых графеновых монослоев в логических интегральных схемах. Однако, для применения таких транзисторов в ВЧ-схемах оно не является решающим. Как отмечено в нобелевской лекции К. С. Новоселова [22], даже первые графеновые транзисторы, изготовленные простейшими способами в плохо контролируемых внешних условиях, продемонстрировали высокочастотные свойства, весьма многообещающие для высокочастотных применений. Эти свойства характеризуются пороговой f_T и максимальной f_{max} частотами, теоретические зависимости которых от основных параметров FET приведены ниже [14, 23–26]:

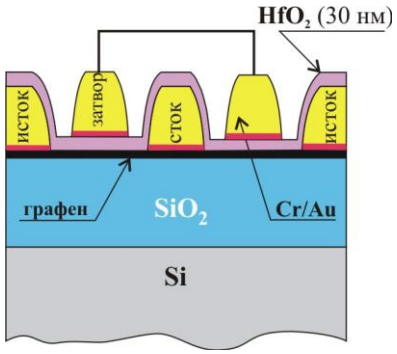
$$f_T = \frac{g_m}{2\pi\ (C_{gs}+C_{gd})} \times \left[\frac{1}{1 + g_d\ (R_s + R_d) + \frac{C_{gd}\ (R_s + R_d)}{C_{gs}+C_{gd}}} \right] \quad (1)$$

$$f_{max} = \frac{f_T}{2\left[g_d\ (R_s + R_{gs}) + 2\pi f_T R_{gs} C_{gd} \right]^{1/2}} \quad (2)$$

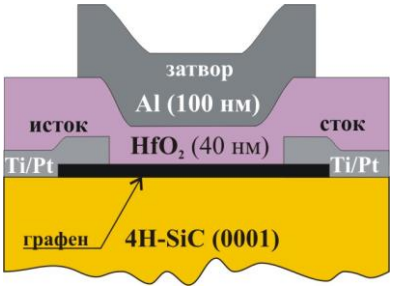
где C_{gs} и C_{gd} – емкости цепей «исток-затвор» и «сток-затвор», R_s и R_d – сопротивления в цепях истока и стока (рис. 1, *б*), R_{gs} – сопротивление в цепи «затвор-исток», $g_m = dI_d/dV_g$, $g_d = dI_d/dV_d$, I_d – ток стока. Если R_s и R_d привести к минимуму, то выражение (1) сводится к виду $f_T = g_m/2\pi\ (C_{gs}+C_{gd})$, где f_T уже не зависит от g_d [23]. Выражение (2) в этом случае можно записать в виде $f_{max} \simeq \simeq g_m/4\pi R_{gs}\left[g_d\ C_{gs} + C_{gd}\ + g_m C_{gd} \right]$. На рис. 5, *а* показана зависимость f_T от длины канала графенового FET-транзистора, где графен синтезировался либо эпитаксиальным способом, либо CVD-методом [27]. С уменьшением длины канала L пороговая частота f_T увеличивается пропорционально 1/L и при длине затвора L ≅ 40 нм превышает 300 ГГц.



а)

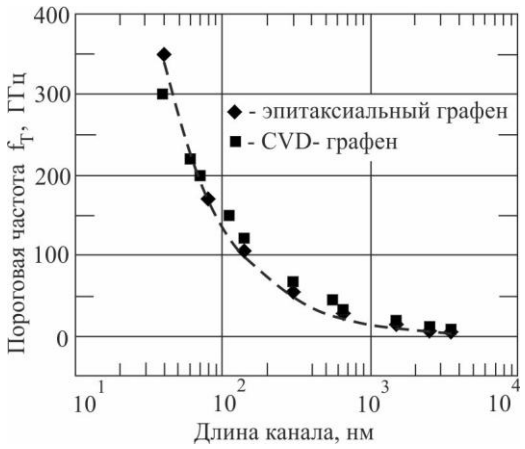


б)

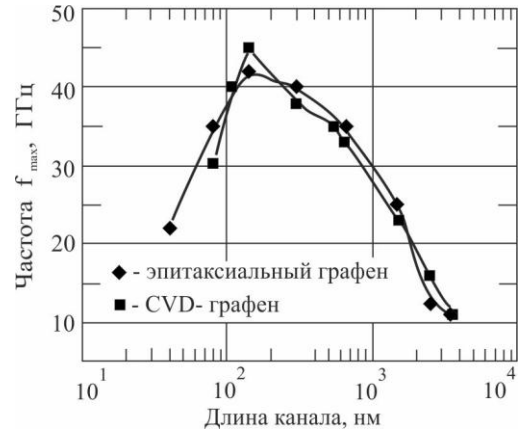


в)

Рис. 4. Конструкции полевых транзисторов на основе графена: а) – подзатворный диэлектрик HfO_2 (15 нм), подложка для графена из SiO_2, верхний полевой электрод Cr/Au [17]; б) – расщепленный верхний полевой электрод Cr/Au, подзатворный диэлектрик из HfO_2 (30 нм), подложка для графена из SiO_2 [18]; в) – подзатворный диэлектрик HfO_2 (40 нм), подложка для графена из 4H-SiC, верхний полевой электрод Al [20].



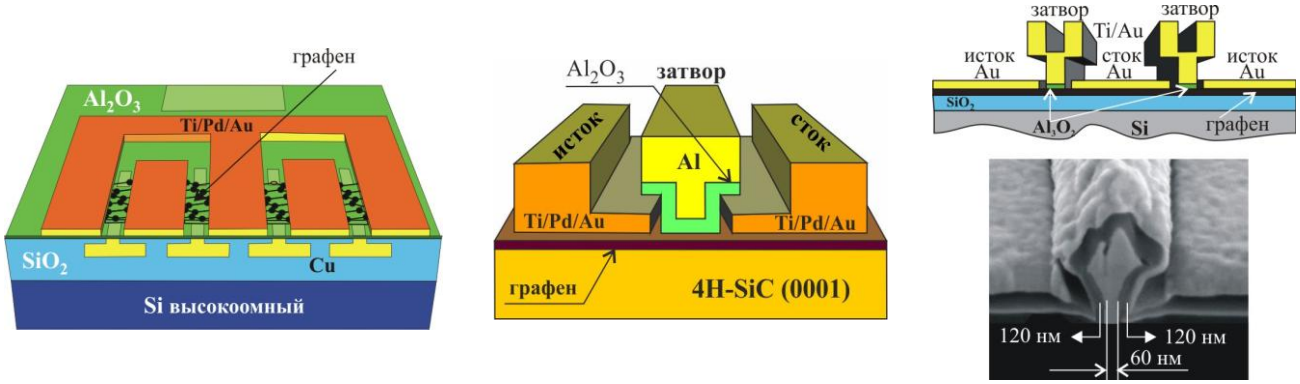
а)



б)

Рис. 5. Зависимости пороговой f_T (а) и максимальной f_{max} (б) частоты от длины канала полевого транзистора на основе графена, полученного эпитаксиальным или CVD-методом [27].

Зависимость f_{max} L носит немонотонный характер (рис. 5, *б*) – при длине канала L ≅ 200 нм она достигает максимального значения ~ 45 ГГц и далее уменьшается по мере уменьшения L. Этот пик на зависимости f_{max} L и существенная разница в значениях f_{max} L и f_T L в работе [27] связываются с одновременным вкладом f_T, g_d и R_{gs}. Значения f_{max} в пределах нескольких десятков гигагерц были также реализованы в работах [28, 29] с конструкциями графеновых транзисторов, подобными приведенным на рис. 4. В 2013 году путем разработки специальной Т-образной конструкции электродов (в том числе многопальцевой), позволившей резко снизить влияние паразитных емкостей и сопротивления в цепи «сток-затвор» (рис. 6, *а*, *б*), значения f_{max} были доведены до 20–70 ГГц [30, 31], которые мало отличалось от значений f_T для тех же приборов. Т-образные электроды формировались при помощи электронной литографии с использованием трехслойного фоторезиста [31]. В 2014 году в работе [32] сообщалось о создании графенового FET-транзистора со структурой, подобной использованной в работе [31], с длиной канала 100 нм и со значениями f_{max} = 105 ГГц и f_T = 93 ГГц. Графен был получен путем сублимации при нагреве SiC-подложки до 1650 °C. В работе [33], учитывая высокую стоимость подложек из SiC, использовался графен, синтезированный CVD-методом на поверхности Cu с последующим переносом на поверхность Si/SiO_2 при помощи жертвенного Au-слоя, позволяющего исключить возможные загрязнения, возникающие в процессе переноса с использованием органических носителей. Длина Т-образного канала транзистора составила 60 нм.



а) *б)* *в)*

Рис. 6. Конструкции высокочастотных полевых транзисторов на основе графена с Т-образными электродами: а) – многопальцевая конструкция, графен на подложке из SiO_2 [30]; б) – графен на подложке из 4H-SiC [31, 32]; в) – графен на подложке из SiO_2 [33].

Были реализованы значения f_{max} = 200 ГГц и f_T = 255 ГГц. В 2010 году авторами работы [35] в GFET была реализована пороговая частота f_T = 300 ГГц. В качестве электрода затвора (рис. 7) была использована проводящая нанонить из Co_2Si (437 мкОм·см, диаметр 180 нм), покрытая слоем Al_2O_3, который служил подзатворным диэлектриком (t_{ox} = 5 нм). Сверхтонкий слой Al_2O_3 изготавливался методом атомно-слоевого осаждения [36–38]. В 2012 году сообщалось о создании GFET со значением пороговой частоты f_T = 427 ГГц [34], признанного рекордным. Параметры и устройство ряда GFET приведены в табл. 1. Таким образом, полевые транзисторы на основе графена по достигнутым значениям пороговой частоты f_T продемонстрировали результаты, сопоставимые с транзисторами типа HEMT и mHEMT на основе InP и GaAs (рис. 8, *а*) и значительно превосходят Si MOSFET. По значениям f_{max} они сравнимы с Si MOSFET, но заметно (в 2–3 раза) уступают лучшим транзисторам на основе соединений III-V групп Периодической системы Менделеева (рис. 8, *б*).

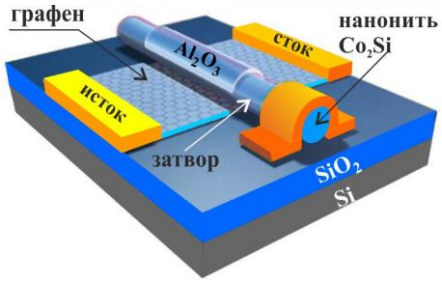


Рис. 7. Конструкция полевого транзистора на основе графена с полевым электродом на основе нанонити Co_2Si-Al_2O_3 [35].

Таблица 1

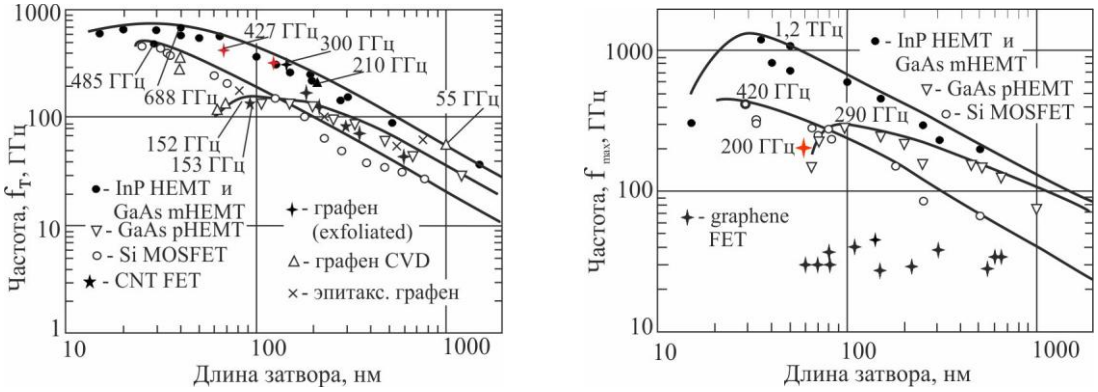
Устройство и основные параметры полевых транзисторов на основе графена

Элементы транзистора							Параметры транзистора				Лит-ра[2)]
Подзатворн. диэлектрик и туннельный диэлектрик[1)]	Затвор			Металл истока	Металл стока		Подвижн. в канале $см^2/В·с$	f_T, ГГц	f_{max}, ГГц	ON/ OFF	
	Верхн. или нижн.		Длина, нм	Металл затвора							
SiO_2 (20 нм)	В	–	265	Ti/Au	Ti/Au	Ti/Au	530 (μ_e) 710 (μ_h)	–	–	–	[16], 2007 Gr/SiO_2
HfO_2 (30 нм)	В	–	500	Cr/Au	Cr/Au	Cr/Au	105–1200	14,7	–	–	[18], 2008 Gr/SiO_2
HfO_2 (15 нм)	В	–	1000	Cr/Au	Cr/Au	Cr/Au	~1200 (μ_{FE})	–	–	~7	[17], 2008 Gr/SiO_2
Al_2O_3 (20 нм)	В	–	1000	Ti/Pt/Au	Ti/Pt/Au	Ti/Pt/Au	~200 (μ_{FE})	4,4	–	–	[28], 2009 Gr/6H-SiC (0001)
h-BN (8,5 нм)	–	Н	440 1000 3000	Cr/PdAu	Cr/Au	Cr/Au	8579 (μ_e) 10713 (μ_h)	–	–	–	[19], 2010 Gr/h-BN
HfO_2 (10 нм)	В	–	240	–	–	–	900–1520 (μ_{FE})	100	10	–	[29], 2010 Gr/SiC
Al_2O_3 (5 нм)	В	–	140	Co_2Si	Ti/Au	Ti/Au	–	300	–	–	[35], 2010 Gr/SiO_2
Al_2O_3 (22 нм)	В	–	67 220	Ti/Au	Pd/Au	Pd/Au	1000–2000 (μ_{FE})	427	–29	–	[34], 2012 Gr/SiO_2
Al_2O_3 (10 нм)	В	–	100	Cu	Ti/Pd/Au	Ti/Pd/Au	2000–2500	≅15-11	20	–	[30], 2013 Gr/Al_2O_3
Al_2O_3 (10 нм)	В	–	100	Al	Ti/Pd/Au	Ti/Pd/Au	7500 (μ_H) 8700 (μ_{FE})	80-110	70	–	[31], 2013 Gr/4H-SiC (0001)
Al_2O_3 (6 нм)	В	–	100	Al	Au	Au	1170 (μ_H)	93	105	–	[32], 2014 Gr/4H-SiC (0001)
Al_2O_3 (8 нм)	В	–	60	Ti/Au	Au	Au	–	255	200	–	[33], 2016 Gr/SiO_2

Окончание табл. 1

Элементы транзистора							Параметры транзистора				Лит-ра[2)]
Подзатворн. диэлектрик и туннельный диэлектрик[1)]	Затвор			Металл истока	Металл стока		Подвижн. в канале $см^2/В{\cdot}с$	f_T, ГГц	f_{max}, ГГц	ON/ OFF	
	Верхн. или нижн.		Длина, нм	Металл затвора							
Графеновые транзисторы на гибких подложках											
HfO_2 (6 нм) PEN (127 мк)	Н	–	500	Ti/Pd/Au	Ti/Pd/Au	Ti/Pd/Au	1500 (μ_{FE})	10,7	3,7		[41], 2012 Gr/ HfO_2
h-BN (10 нм) PEN (127 мк)	В	–	375	Ti/Au	Ti/Pd-Au	Ti/Pd-Au	2250 (μ_{FE})	12,0	10,6	–	[43], 2015 Gr/hBN
AlO_x (< 5 нм) PET (125 мк)	В	–	200	Al	Cr/Au	Cr/Au	–	32,0	20,0		[44], 2014 Gr/PET
Туннельные транзисторы на основе моно- (Gr) и бислоев (BGr) графена											
SiO_2 (300 нм) h-BN (~1 нм)	Н и В				Ti/Au	Ti/Au				50	[51], 2012 Gr/h-BN
SiO_2 (300 нм) MoS_2 (~1 нм)	Н и В				Ti/Au	Ti/Au				~10^4	[51], 2012 Gr/MoS_2
ZrO_2 (~2 нм) SiO_2 (10 нм)	Н и В				Ti/Au	Ti/Au				~4×10^4	[57], 2016 BGr/ SiO_2
Транзисторы на основе графеновых нанолент (GNR)											
SiO_2 (300 нм) W = 10 нм W = 9 нм W = 5 нм	Н	–	200	P^+-Si	Pd	Pd	(100–200) μ_p	–	–	100 10^5 $>10^6$	[66], 2008 GNR/SiO_2
HfO_2 (1,5 нм) W = 0,95 нм	Н	–	20	P^+-Si	Pd	Pd	–	–	–	10^5	[67], 2017 GNR/ HfO_2
SiO_2 (50 нм) W = 0,74 нм	Н	–	20–40	P^+-Si	Pd	Pd	–	–	–	~$3,6\times10^3$ (77 K)	[69], 2013 GNR/SiO_2

Примечание: [1)] – туннельный диэлектрик указан для G-TFET и BG-TFET; [2)] – в нижней строке указана поверхность, на которой расположен слой, бислой графена или графеновая нанолента.

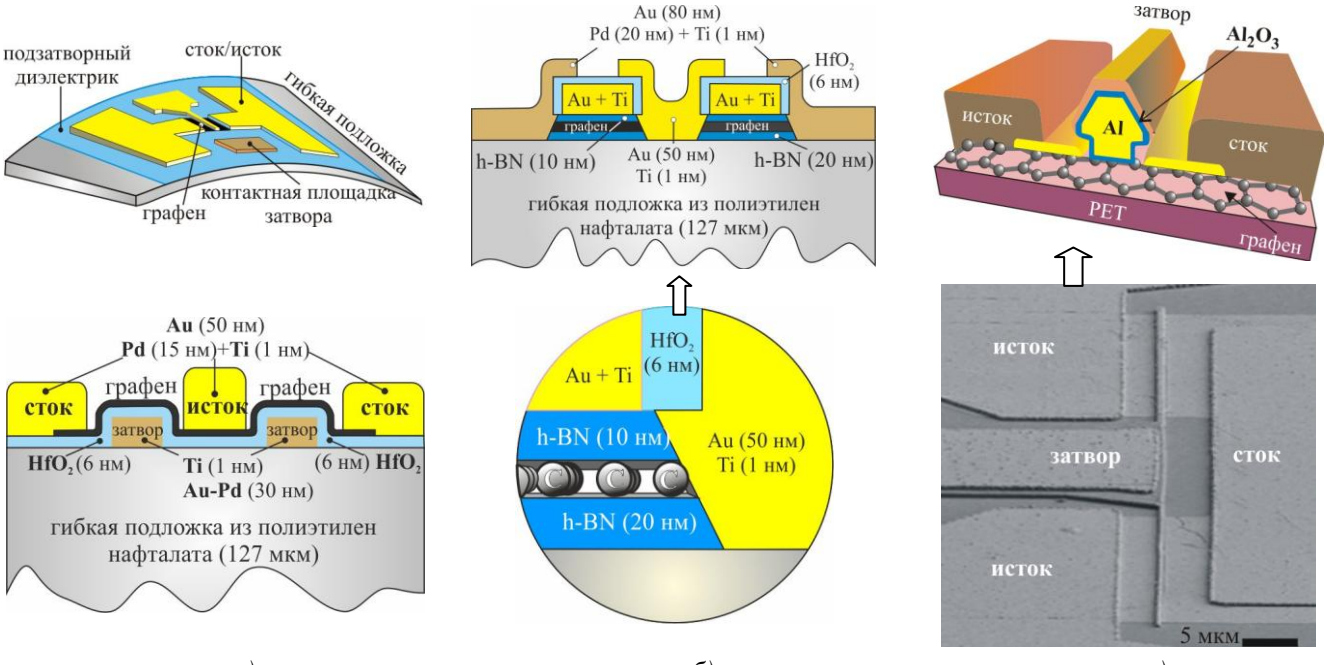


а) *б)*

Рис. 8. Зависимости пороговой f_T и максимальной f_{max} частот от длины затвора для графеновых транзисторов из работы [14]; максимально достигнутые для GFET значения выделены красным цветом; одновременно показаны значения этих частот для Si транзисторов типа MOSFET, HEMT из InP и mHEMT из GaAs (транзисторы с высокой подвижностью электронов и метаморфные), pHEMT из GaAs (псевдоморфные), транзисторы на основе углеродных нанотрубок CNT FET.

Для создания гибких и пластичных электронных компонентов на основе 3D-структур обычно используются органические и полимерные полупроводниковые материалы, существенным недостатком которых является крайне низкая подвижность носителей зарядов (порядка 0,1 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ [39]). В отличие от органических и полимерных 3D-материалов двумерные 2D-структуры, включая графен, обладая отличной механической прочностью, будучи ультратонкими и имея высокую подвижность носителей зарядов, выглядят чрезвычайно перспективными для применений для изготовления электронных компонентов на гибких подложках. В работе [40] для графена, синтезированного на гибкой полиимидной подложке со слоем Al_2O_3 (20 нм) реализованы подвижности 4930 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ и 1130 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ электронов и дырок соответственно.

В работах [41, 42] в 2012–2013 гг. описан GFET-транзистор на гибкой подложке из полиэтиленнафталата (PEN) толщиной 127 мкм (рис. 9, *а*). Графен был синтезирован CVD-методом поверх слоя из HfO_2, предварительно нанесенного на поверхность PEN-методом атомно-слоевого осаждения и являющегося подзатворным диэлектриком ($\varepsilon \approx 13$). При длине канала транзистора 500 нм были получены значения пороговой и максимальной частот 10,7 ГГц и 3,7 ГГц соответственно. Деформационный предел в направлении, параллельном затвору транзистора составил 1,75–2 %. В работе [43] с целью исключения влияния на поверхность графена операций формирования элементов транзистора и сохранения высокой подвижности носителей зарядов верхняя и нижняя стороны графенового слоя пассивировались при помощи нитрида бора (h-BN) толщиной 10 нм (рис. 9, *б*). В результате подвижность, измеренная в канале транзистора, составила 2200 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$, а пороговая и максимальная частоты при длине канала 375 нм составили 12,0 ГГц и 10,6 ГГц соответственно ($f_{max}/f_T = 0{,}88$). В структурах с графеном, полностью капсулированном слоями h-BN, реализуются наиболее высокие из известных подвижности электронов, равные $1{,}4 \times 10^5$ $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ [44] и $1{,}37 \times 10^4$ $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ [45]. В работе [46] при изготовлении GFET на гибкой подложке из полиэтилентерефталата толщиной 125 мкм с целью снижения паразитных сопротивлений и емкостей, как и ранее в работах [30–33], была реализована конструкция с Т-образными электродами (рис. 9, *в*). При длине канала 200 нм пороговая и максимальные частоты составили 32,0 ГГц и 20,0 ГГц соответственно, а деформационный предел оказался равным $\varepsilon_{yy} = 2{,}5$ %.



а) *б)* *в)*

Рис. 9. Конструкции GFET-транзисторов на гибких подложках: а) – подложка из полиэтиленнафталата, нижний полевой электрод [41]; б) – подложка из полиэтиленнафталата (PEN), верхний полевой электрод

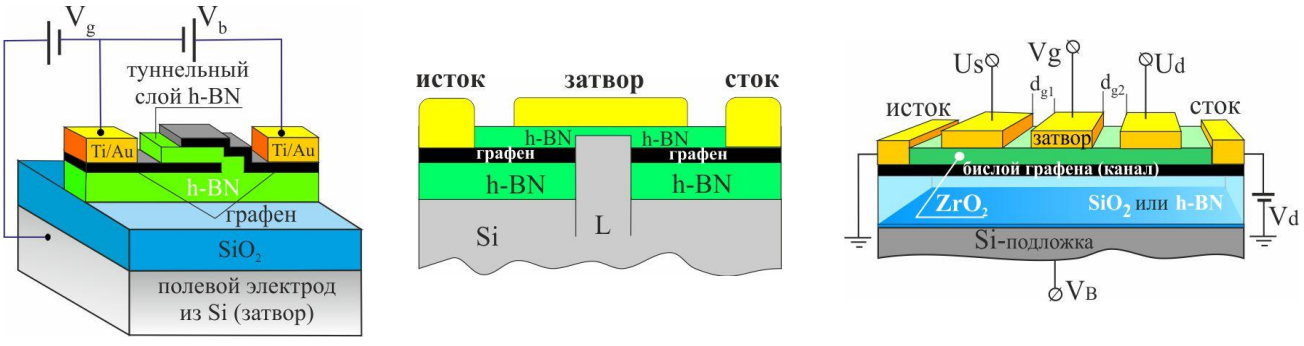
[43]; в) – подожка из полиэтилентерефталата, верхний Т-образный полевой электрод [46].

Исследования бесщелевого графена в качестве канала полевых транзисторов уже привели к созданию ряда высокочастотных образцов гигагерцового диапазона с удовлетворительными значениями пороговой частоты f_T, в том числе на гибких носителях, и в настоящее время ведутся в направлении увеличения максимальной частоты f_{max}. Среди опубликованных в последнее время работ обращает на себя внимание работа [47], где описан GFET с подзатворным диэлектриком на основе AlO_x толщиной 4 нм, в котором f_{max} = = 21,3 ГГц и $f_{max}/f_T \sim 3$.

Транзисторы для СБИС цифровой логики должны иметь отношение токов стока в открытом ($I_{d,ON}$) и закрытом ($I_{d,OFF}$) состояниях порядка $10^4 \div 5\times10^7$ [48]. Величина этого отношения (ON/OFF) определяется формулой $ON/OFF \sim E_g/mk_BT$ (m – числовой фактор, зависящий от конструкции транзистора, слабо меняющийся вблизи 2, k_B – постоянная Больцмана). Если E_g = 0,5 эВ, то ON/OFF ~ 10^4,
если E_g = 0,9 эВ, то ON/OFF ~ $3{,}3\times10^7$. Следовательно, канал транзисторов для цифровой логики предпочтительно изготавливать на основе полупроводникового материала с энергетической щелью в интервале 0,5÷0,9 эВ без ухудшения подвижности носителей зарядов. Кроме того, как отмечено в работе [48], наличие энергетической щели в зонной структуре обеспечивает необходимые значения тока насыщения FET и тем самым высокие значения f_{max} в ВЧ-приборах.

К настоящему времени разработан ряд методов создания энергетической щели в структурах на основе графена: химическая адсорбция атомов на поверхности графеновой пленки, легирование, создание вакансий путем удаления атомов углерода, внесение топологических дефектов Стоун-Вальса, использование эффектов размерного квантования и др. [49]. Заметим, что двухслойный графен обладает энергетической щелью, но её ширина всего порядка 0,1 эВ [50].

Для получения низких значений тока в закрытом состоянии в 2012 году была предложена конструкция полевого транзистора туннельного типа на основе монослоя графена (TGFET) [51]. В приборе использован эффект квантового туннелирования из графенового электрода через тонкий ($t_{h\text{-}BN}$ ~ 1 нм) диэлектрический барьер из h-BN ($E_g \approx 7{,}1$ эВ). Высота туннельного барьера и концентрации носителей зарядов в контактах управлялись напряжением расположенного снизу затвора (рис. 10, *а*). Однако, влияние затвора на проводимость в канале оказалось слабым (неэкспоненциальным) и было реализовано сравнительно невысокое значение ON/OFF ~ 50.



а) *б)* *в)*

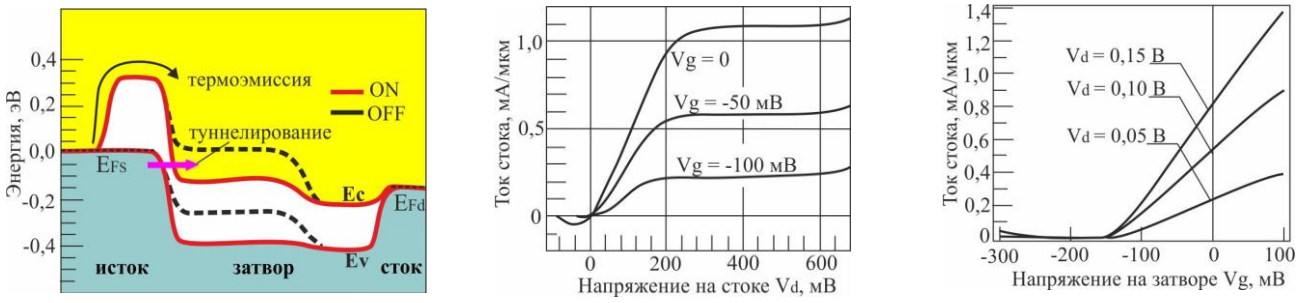
Рис. 10. Конструкции туннельных полевых транзисторов на основе графена (G-TFET) и бислоя графена (BG-TFET): а) – G-TFET с туннелированием через слой h-BN [51]; б) – G-TFET с туннелированием через слой Si [52]; в) – BG-TFET с туннелированием через слой ZrO_2 [57].

Использование авторами работы [51] в качестве туннельного диэлектрика дисульфида

молибдена MoS_2 ($E_g \approx 1{,}3$ эВ) с более высокой туннельной прозрачностью позволило реализовать значение ON/OFF ~ 10^4. В работе [52] предложна усовершенствованная конструкция туннельного транзистора (рис. 10, *б*), где в центр канала транзистора введена кремниевая туннельная вставка шириной L ~ 5 нм. В этом случае высота барьера составляет приблизительно половину ширины запрещенной зоны кремния (0,5 эВ) и обеспечивает высокую прозрачность барьера. Зависимость тока от напряжения на затворе носит экспоненциальный характер, а обратная крутизна подпороговой характеристики близка к предельному значению (60 мВ/дек)$^{-1}$, что, как показано в работе [52], характерно для туннельных транзисторов на основе графена и любых транзисторов с барьером Шоттки.

Для полевых туннельных транзисторов на основе бислоя графена (BG-TFET), несмотря на сравнительно малую ширину запрещенной зоны графенового бислоя, в работах [53–57] была показана возможность реализации больших значений отношения ON/OFF. Структурная схема такого транзистора показана на рис. 10, *в*, энергетическая диаграмма на рис. 11, *а*, а теоретические выходные характеристики на рис. 11, *б*, *в*. Расчет, проведенный в работе [57], показал возможность реализации достаточно высоких значений ON/OFF ~ $3{,}5\times10^4$, обусловленную существованием сингулярности Ван Хова вблизи краев зоны проводимости и валентной зоны бислоя графена [56]. Это одна из уникальных особенностей зависимости $E(\mathbf{p})$ в энергетическом спектре двухслойного графена, которая отсутствует у других 2D-материалов. В результате обеспечиваются большая плотность тока в открытом состоянии BG-TFET-транзистора I_{ON} ~ 1 мА/мкм и малая плотность тока в закрытом состоянии I_{OFF} ~ 2×10^{-5} мА/мкм. Существенным элементом конструкции рассматриваемого туннельного транзистора на основе графенового бислоя является наличие полевых электродов V_B, Us и Ud. Положительное смещение $V_B > 0$ на нижнем полевом электроде обеспечивает появление энергетической щели в спектре и повышенную электронную плотность в бислое. Отрицательно смещение $U_S < 0$ приводит к электростатическому p^+-допированию истоковой области транзистора, а положительное напряжение $U_d > 0$ обеспечивает дополнительное увеличение высоты барьера для дырок, инжектируемых из области стока. Заметим, что аналогичное использование концепции электростатического допирования (electrostatic carrier doping [58–62]) вместе с применением подзатворных диэлектриков с высоким значением диэлектрической проницаемости (например, HfO_2 с $\varepsilon \sim 25$) в туннельных и MOSFET транзисторах на основе кремниевых структур способно обеспечить рекордно высокие значения отношения токов открытого и закрытого состояний ON/OFF ~ $7{,}8\times10^{10}$ [61].

Другое, активно развиваемое, направление связано с использованием графеновых нанолент (graphene nanoribbons, GNRs) в качестве материала канала транзистора (GNR FET).

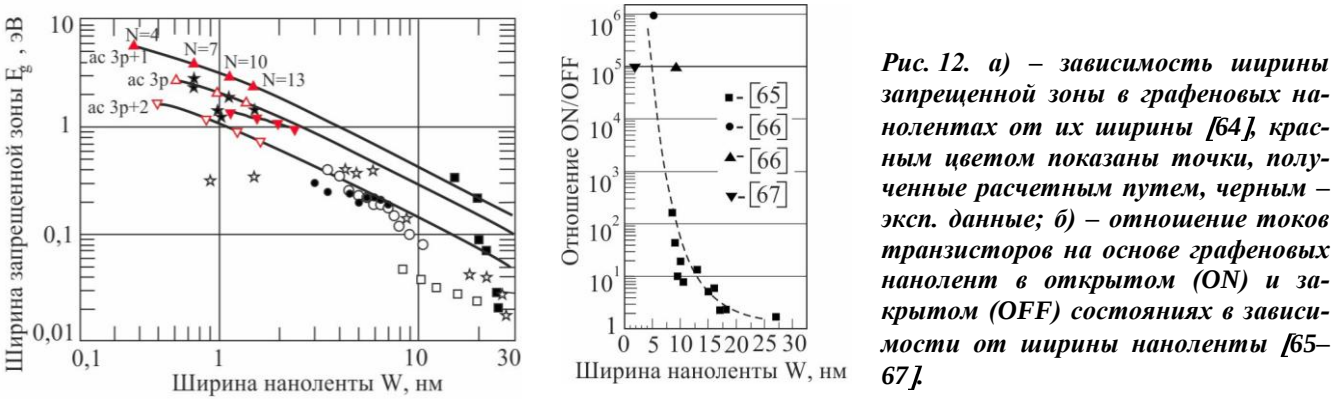


а) *б)* *в)*

Рис. 11. Характеристики туннельного транзистора на основе бислоя графена и туннелированием через слой ZrO_2 (рис. 10, в): а) – энергетические диаграммы транзистора во включенном (ON) и выключенном (OFF) состояниях, E_{Fs}, E_{Fd} – квазиуровни Ферми; б) – зависимость плотности тока стока от напряжения на стоке $I_d(V_d)$ для трех напряжений на затворе V_g; в) – зависимость плотности тока стока от

напряжения на затворе $I_d(V_g)$ ***для трех напряжений на стоке*** V_d ***; зависимости рассчитаны при следующих условиях:*** d_{ZrO_2} ***= 2 нм (ε = 25),*** d_{SiO_2} ***= 10 нм,*** d_{g1} ***= 5 нм,*** d_{g2} ***= 10 нм,*** V_B ***= 3,3 В,*** U_S ***= -0,6 В,*** U_d ***= 0,25 В [57].***

Наличие и ширина энергетической щели определяются шириной W и структурой краев нанолент, электронные свойства которых подробно описаны в обзорах [49, 63, 64]. Графеновые наноленты наиболее распространенных видов в зависимости от формы краев могут относиться к «кресельному» («arm-chair», A-GNR) или «зигзагообразному» («zigzag», Z-GNR) типу. Они описываются индексом N, который в случае наноленты типа A-GNR равен числу димеров C_2, укладывающихся на поперечном срезе наноленты, а в случае наноленты типа Z-GNR он равен числу атомов C, лежащих в поперечном срезе. Ширина W нанолент типа A-GNR определяется формулой $W_{A\text{-}GNR} = (3N/2-1)\,a$, где a = 0,142 нм, а ширину нанолент типа Z-GNR можно определить формулой $W_{Z\text{-}GNR} = (N-1)\,a\sqrt{3}/2$. В графеновых нанолентах конечной длины обоих типов вследствие пониженной размерности за счет размерного квантования образуется энергетическая щель, которая растет с уменьшением ширины W (рис. 12, *а*). Судя по опубликованным экспериментальным данным [64], графеновые наноленты с шириной W порядка ~ 10 нм имеют запрещенную зону $E_g \sim 0{,}1$ эВ. При уменьшении ширины W до значений порядка 1 нм величина запрещенной зоны возрастает до 1÷2 эВ. С уменьшением ширины нанолент наблюдается резко выраженное увеличение отношения токов полевых транзисторов на их основе в открытом (ON) и закрытом (OFF) состояниях (рис. 12, *б*). При ширинах нанолент $W \sim 1 \div 5$ нм были получены рекордно высокие величины этого отношения $10^6 \leq ON/OFF \leq 10^7$ [63–67]. Такой же рост отношения ON/OFF имеет место при снижении рабочей температуры транзисторов. Например, в работе [68] при уменьшении температуры от 300 К до 4,2 К отношение ON/OFF возрастало со значения 10 до значения 10^6. При температуре жидкого азота в работе [69] для GNR FET с нанолентой в канале транзистора шириной $W \cong 0{,}74$ нм было получено значение ON/OFF, равное $3{,}6\times10^3$.



а) *б)*

Рис. 12. а) – зависимость ширины запрещенной зоны в графеновых нанолентах от их ширины [64], красным цветом показаны точки, полученные расчетным путем, черным – эксп. данные; б) – отношение токов транзисторов на основе графеновых нанолент в открытом (ON) и закрытом (OFF) состояниях в зависимости от ширины наноленты [65–67].

Высокочастотные свойства GNR FET исследовались в работе [70]. При ширине графеновой наноленты W ~ 20÷50 нм в канале транзистора было реализовано отношение ON/OFF ~ 5 и значения пороговой (f_T) и максимальной (f_{max}) частот, равные 82 ГГц и 20 ГГц, соответственно.

С 2007–2008 гг., когда были опубликованы первые работы с описанием полевых транзисторов на основе графеновых нанолент [66, 71, 72], предложен и исследован ряд различных конструкций GNR FET, показанных на рис. 13.

В табл. 1 представлены основные свойства и конструктивные характеристики полевых транзисторов на основе моно-, бислоев графена и графеновых нанолент, в том числе на гибких подложках.

Одним из возможных и активно иссле-

дуемых путей дальнейшей миниатюризации полевых транзисторов в текущем столетии стало использование электронных структур на основе единичных молекул или молекулярных ансамблей (*молекулярная электроника* или *молетроника*) и даже единичных атомов [78–81]. В основу другого направления, получившего название *одноэлектроника*, легло явление дискретного туннелирования одиночных электронов в структурах с туннельными переходами малой емкости. Теория коррелированного туннелирования для туннельной системы, где проявляется кулоновское взаимодействие электронов, была разработана в 70-х годах прошлого века (см., например, [82]). С тех пор было теоретически предложено и реализовано множество конструкций полевых транзисторов на основе одноэлектронного туннелирования, которые получили название одноэлектронных транзисторов (single electron transistors, SET).

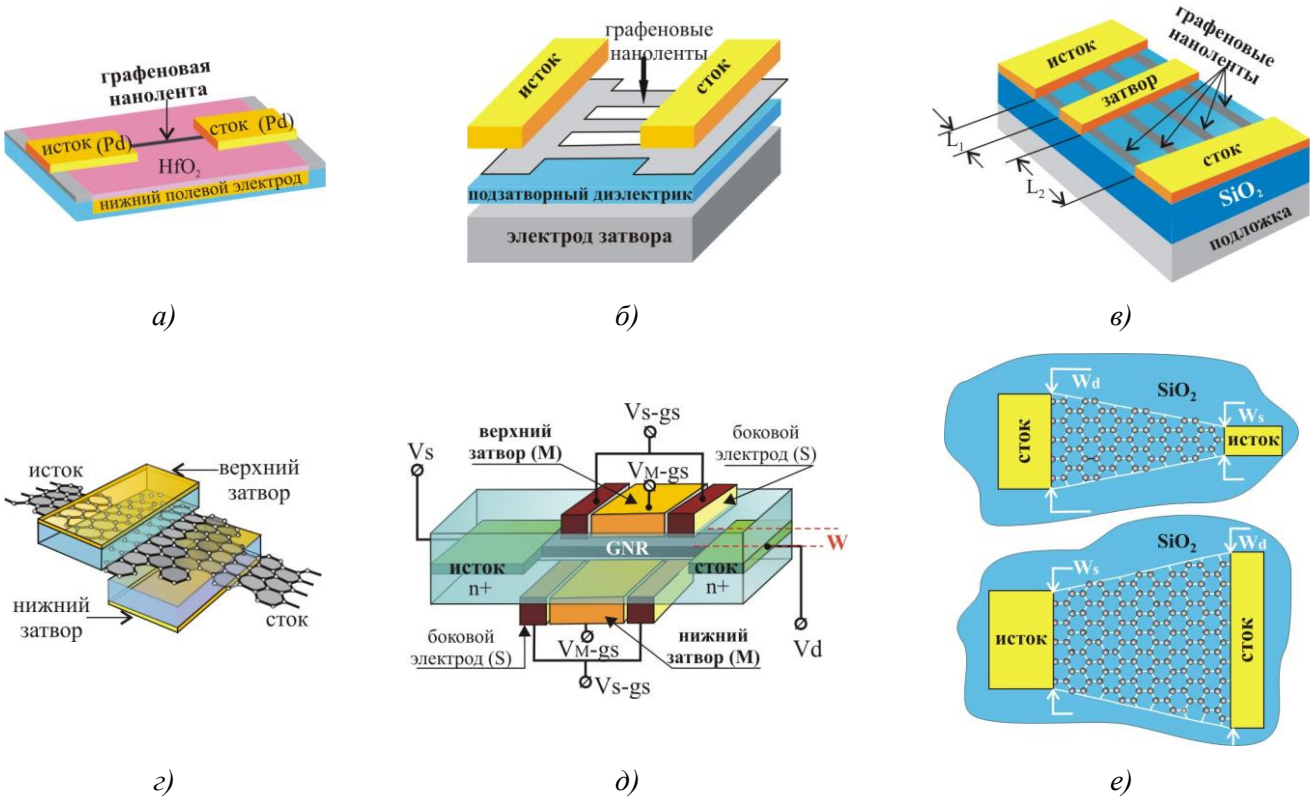


Рис. 13. Конструкции полевых транзисторов, использующих графеновые наноленты в качестве материала полевого канала: а) – одноканальный GNR FET с нижним полевым электродом [67]; б) – многоканальный GNR FET с нижним полевым электродом [73]; в) – многоканальный GNR FET с ассиметрично расположенным верхним полевым электродом и барьером Шоттки [74]; г) – одноканальный GNR FET с нижним и верхним полевыми электродами и отрицательным сопротивлением [75]; д) – одноканальный GNR FET с нижним и верхним полевыми электродами и электростатическим допированием сток-истоковой областей [76]; е) – затворы переменной ширины GNR FET с нижним полевым электродом [77].

Принципиальная схема SET показана на рис. 14, *а*. Прибор состоит из проводящего центрального «островка» с малой собственной емкостью, соединенного с истоковым и стоковым электродами двумя туннельными переходами малой емкости и малой проводимости ($C_{П1}$, $C_{П2}$, $G_{П1}$, $G_{П2}$) и имеющего емкостную связь с электродом затвора через диэлектрический слой C_0. «Островок» представляет собой проводящий фрагмент нанометровых размеров, изолированный от сток-истоковых электродов сверхтонкими диэлектрическими прослойками, через которые при определенных условиях происходит движение электронов (коррелированный туннельный транспорт), обеспечивающее протекание тока в цепи исток – туннельный переход П1 – «островок» – туннельный переход П2 – сток. Туннельный ток сильно зависит от заряда центрального «островка», который включает в

себя заряд, наведенный электрическим полем затвора, что обеспечивает управление туннельным током через SET путем изменения потенциала электрода затвора. Если в системе выполняется условие $e^2/2C_\Sigma \gg k_B T_{раб}$ (e – заряд электрона, $C_\Sigma = C_{П1} + C_{П2} + C_g$, $T_{раб}$ – рабочая температура, k_B – постоянная Больцмана), то туннелирование даже одного электрона из истока на «островок» полностью заблокирует другие переходы из-за взаимного кулоновского отталкивания электронов до тех пор, пока электрон не будет удален из центрального «островка» (эффект кулоновской блокады туннелирования). Таким образом, при включенном напряжении между стоком и истоком транзистора электрический заряд начнет перемещаться, накапливаясь на туннельном барьере, который он сможет преодолевать только порциями, равными заряду электрона. Туннельные переходы электронов коррелируют друг с другом по времени, в результате чего в системе устанавливается режим когерентных колебаний напряжения и заряда с частотой $I_{тун(ср)}/e$. Кроме вышеприведенного условия для наблюдения эффекта одноэлектронного туннелирования должно выполняться второе условие – $G_{П1,П2} \ll e^2/h$ (h – постоянная Планка), при реализации которого квантовые флуктуации в переходе становятся малыми по сравнению с характерной зарядовой энергией туннельного перехода $e^2/2C_{П1,П2}$. Вышеприведенные ограничения на емкость и проводимость туннельных переходов могут быть реализованы в системах с предельно малыми размерами центрального «островка». Для наблюдения одноэлектронного эффекта при комнатной температуре ($T_{раб}$ = = 300 К) его емкость должна быть порядка 0,1÷1 аттофарады (10^{-19}÷10^{-18} Ф), а размеры не превышать 1÷3 нм.

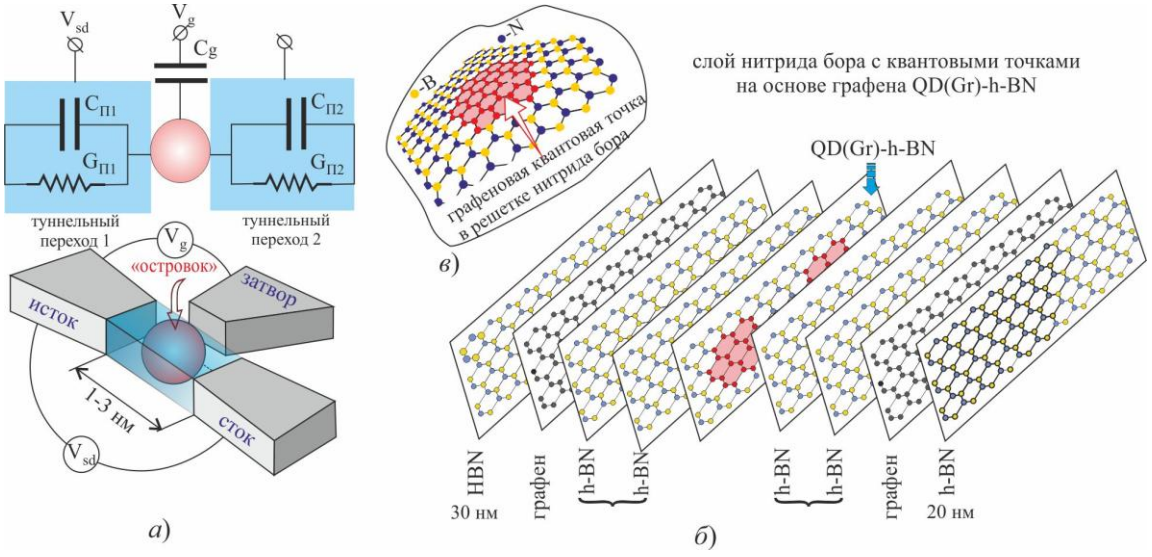


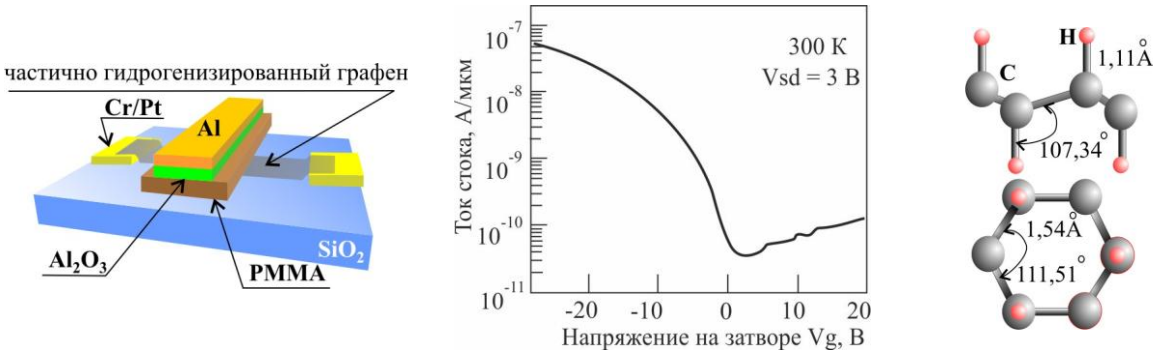
Рис. 14. Одноэлектронные полевые транзисторы (SET): а) – принципиальная схема транзистора и его эквивалентная схема [82]; б) – Ван-дер-Ваальсова структура SET на основе графеновых квантовых точек [85]; в) – графеновая квантовая точка в матрице атомов нитрида бора [85].

Этого можно добиться при использовании в качестве материала центрального «островка» кластерных молекул [83], квантовых точек на основе 2D-материалов [84, 85], нанотрубок [86], фуллеренов [87], нанонитей [79] и т. п. Структуры одноэлектронных транзисторов на основе графена рассматриваются в работах [84, 85, 88–92]. На рис. 14, *б* показана схема SET вертикального типа на основе графеновых квантовых точек, встроенных в матрицу атомов гексагонального нитрида бора [85]. Транзистор представляет собой Ван-дер-Ваальсову структуру, состоящую из чередующихся слоев нитрида бора (h-BN), графена (Gr) и слоя нитрида бора с множественными квантовыми точками на основе графена (QD-Gr-h-BN). Взаимное расположение слоев показано на рис. 14, *б*. Графеновые квантовые точки имеют размеры ~ 7, 10 и 13 нм. В структуре SET каждая квантовая точка играет роль централь-

ного «островка» с малой собственной емкостью и включена параллельно другим квантовым точкам. Подложка из низкоомного кремния с изолирующим слоем SiO_2 служит нижним полевым электродом, управляющим туннельными токами. Графеновые слои являются сток-истоковыми электродами. Туннельные переходы образованы в структурах «двойной слой нитрида бора–матрица атомов нитрида бора со встроенными квантовыми точками из графена–двойной слой нитрида бора». Двойной слой нитрида бора изолирует квантовые точки от сток-истоковых электродов на основе графена.

К числу производных графена обычно относят квазидвумерные наноструктуры, в которых к графеновой матрице присоединены адатомы различной природы, а также несколько двумерных аллотропных кристаллографических форм графена [93–105]. Адатомами могут быть водород H (графан, графон), фтор F (фторографен), хлор Cl (хлорографен), бром Br (бромграфен), иод I (иодграфен), а также металлы Li, Na, K, Rb, Cs и комбинации HF, HCl, HClF, HBr, LiF, LiH. В ряде случаев такая адсорбция внешних атомов приводит к появлению запрещенной зоны в энергетическом спектре: для графана C_2H_2 ($E_g \simeq 5{,}7$ эВ), для фторографена C_2F_2 ($E_g \simeq 7{,}4$ эВ) и т. д. [95]. В некоторых аллотропных кристаллографических модификациях графена имеется энергетическая щель: α-графин ($E_g \simeq 0 \div 0{,}005$ эВ), β-графин ($E_g \simeq 0{,}03 \div 0{,}04$ эВ), γ-графин ($E_g \simeq 0{,}5$ эВ) [100], графдин ($E_g \simeq 0{,}5 \div 1{,}1$ эВ) [102]. Изменением ширины нанолент, изготовленных из аллотропных форм графена, также можно управлять шириной запрещенной зоны [105]. Термодинамическая стабильность кристаллографических аллотропных форм и функцианализированного графена исследовалась в работах [106–109].

Способы изготовления и свойства полевых транзисторов на основе кристаллографических аллотропных форм и функцианализованного графена описаны в работах [99, 110–113]. На рис. 15, *а* показана принципиальная схема полевого транзистора с полевым каналом на основе частично гидрогенизованного графена (степень гидрогенизации $\eta = 25$ %). Подзатворным диэлектриком является двойной слой оксида алюминия и полиметилметакрилата (PMMA) емкостью порядка $2{,}1 \times 10^{-8}$ Ф·см$^{-2}$ и толщинами 50 нм и 60 нм соответственно. Металл полевого электрода изготовлен из алюминия (50 нм), электроды стока и истока из платины с подслоем хрома (Cr/Pt). Выходная характеристика полевого транзистора с полевым каналом на основе частично гидрогенизованного графена представлена на рис. 15, *б*. При степени гидрогенизации $\eta = 25$ % монослой представляет собой паратип C_4H, гидрогенизованного с одной стороны графена, с шириной запрещенной зоны порядка 3,5 эВ.



а) *б)* *в)*

Рис. 15. Полевой транзистор на основе частично гидрогенизованного графена C_4H (степень гидрогенизации водородом 25 %) [99]: а) – конструкция FET, PMMA – полиметилметакрилат, хим.формула $(C_5O_2H_8)_n$, термопластичный прозрачный (92 %) пластик, $\rho = 10^{13} \div 10^{14}$ Ом·м, $\varepsilon = 2{,}5 \div 4{,}2$; б) – выходная характеристика FET; в) – квазидвумерный слой гидрогенизованного графена со степенью гидрогенизации 100 % (графан).

2.2 Транзисторы на основе ди- и трихалькогенидов переходных металлов

Попытки изготовления полевых транзисторов с каналом на основе ультратонких структур различной природы, отличных от графена, предпринимались, начиная с середины 1990-х годов [114–118]. Первоначально основное внимание при изготовлении тонких полупроводниковых слоев с толщиной в несколько сотен нанометров уделялось органическим материалам, с использованием которых были реализованы подвижности носителей в полевом канале транзисторов 0,015÷
÷0,1 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ и значения отношения ON/OFF ~ 10^4 [114, 115]. Значения подвижностей порядка 0,6÷1,0 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ были реализованы в тонкопленочных полевых транзисторах (TFT) с каналом на основе CdSe [116] и перовскита $(C_6H_5C_2H_4NH_3)SnI_4$ [117], где удалось достичь значений отношения ON/OFF > 10^4. При использовании нанолент на основе CdS и наносло-ев из кремниевых нанонитей в качестве материала канала TFT были получены значения подвижностей в канале ~ 283 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ и ~ 123 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$, а отношение ON/OFF составило величину порядка 10^5 [118]. К числу ранних исследований, посвященных применению 2D-халькогенидов переходных металлов (WSe_2) для изготовления полевых транзисторов, относится работа [119].

К настоящему времени разработки FET-транзисторов с использованием ультратонких монослойных или многослойных 2D-дихалькогенидов переходных металлов в качестве материала канала продолжают проводиться в отношении практически всех известных полупроводниковых соединений вида MX_2, обладающих конечной щелью в своем энергетическом спектре (M – переходной металл, X – один из халькогенов S, Se или Te): MoS_2 [120–138], $MoSe_2$ [138–142], $MoTe_2$ [143–146], WS_2 [147–150], WSe_2 [119, 151–156], WTe_2 [157], ZrS_2 [159–161], $ZrSe_2$ [161, 162], HfS_2 [161, 163–166], $HfSe_2$ [161, 162, 167, 168], PtS_2 [169], $PtSe_2$ [170, 171], $PtTe_2$ [172], PdS_2 [173, 174], $PdSe_2$ [175], ReS_2 [176, 185], $ReSe_2$ [186–188].

Материалы этой группы в зависимости от политипной формы, количества монослоев и др. могут проявлять как полупроводниковые, так и металлические и даже сверхпроводящие свойства, иметь малую запрещенную зону ($E_g < 0{,}1$ эВ), либо зону, сравнимую с широкозонным диэлектриком, или являться топологическим изолятором. Это открывает возможность широкого выбора и многочисленных комбинаций различных MX_2 слоев при изготовлении полевых, туннельных, гетеро- и др. транзисторных структур. Расчеты, проведенные в 2011 году в работе [120], показали возможность создания FET с соотношением ON/OFF > 10^{10} при использовании в качестве материала канала (длина затвора ~ 15 нм) монослоя MoS_2 с подзатворным диэлектриком из HfO_2. Теоретический анализ предельных значений подвижностей μ с учетом рассеяния на продольных акустических фононах в дихалькогенидах MX_2 (M = Mo, W, Sn, Hf, Zr, Pt; X = S, Se, Te) показал возможность достижения значений $\mu \geq 2{,}5\times10^3$ $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ (300 K) в монослоях таких соединений, как $MoTe_2$ ($\mu \cong 2{,}53\times10^3$ $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$) и $HfSe_2$ ($\mu \cong 3{,}58\times$ $\times10^3$ $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$), тогда как в дисульфидах ZrS_2 и HfS_2 подвижность при комнатной температуре могла составлять $(1{,}3\div1{,}8)\times10^3$ $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ [189], что обеспечивало реализацию высокочастотных свойств транзисторов с каналом на основе этих 2D-материалов. Сведения о параметрах полевых транзисторов на основе группы дихалькогенидов переходных металлов, практически реализованных за последнее время, представлены в табл. 2. Для изготовления их полевого канала, главным образом, использовались два метода: микромеханическое расщепление (МС) объемных монокристаллов и метод химического осаждения из паровой фазы (CVD). Конструкции FET мало отличаются от ранее описанных конструкций, примененных при изготовлении графеновых транзисторов с двумя типами полевых затворов: нижнего, расположенного со стороны подложки или верхнего со стороны 2D-слоя. Наиболее высокие значения отношения ON/OFF $\cong 5\times10^8$ при средней подвижности в канале $\mu \cong 31$ $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ были реализованы в 2016 году для FET на основе монослоя WSe_2

($E_g \sim 1,6$ эВ), термообработанного в воздушной среде при температуре 150 °C [153]. Недостаточно высокие значения отношения ON/OFF = $10^5 \div 10^7$, полученные для транзисторов с использованием мультислойных $MoTe_2$ [143], $ZrSe_2$ [162] и $HfSe_2$ [162] могут быть связаны с неоптимальным выбором материала сток-истоковых электродов, что приводило к появлению заметных энергетических барьеров Шоттки в приконтактных областях стока и истока транзисторов. В работе [122] при использовании скандия (Sc) в качестве материала сток-истоковых электродов в транзисторе с каналом на основе 4SL MoS_2 была достигнута высокая омичность контактов и реализовано значение подвижности в канале μ = 700 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$. В транзисторах с каналом на основе MoS_2 со сток-истоковыми электродами из золота с подслоем титана (Au/Ti) достигнуты значения пороговой и максимальной частот, равные (20÷42) ГГц и (11,4÷50) ГГц, соответственно [128, 137].

Таблица 2

Устройство и основные параметры полевых 2D-транзисторов на основе дихалькогенидов переходных металлов

Элементы транзистора							Параметры транзистора				Способ изготовления материала канала. Лит-ра, год публикации
Число монослоев, материал канала	Затвор				Исток	Сток	подвижн. в канале $см^2/В \cdot с$	f_T, ГГц	f_{max}, ГГц	Отношение ON/OFF	
	подзатворн. диэлектрик, толщина (нм)	верх.В или нижн. Н	длина (нм)	материал электрода затвора	материал электрода истока	материал электрода стока					
1SL **MoS_2**	HfO_2 2,8	В	15	Au	Au	Au	220	–	–	$>10^{10}$	Расчет [120], 2011
1SL **MoS_2**	(ALD) HfO_2 30	В	500	Au	Au	Au	200	–	–	$>1\times0^8$	MC MoS_2 [121], 2011
5SL **MoS_2**	h-BN 10–30	Н	3×10^3	Gr	Ti/Au	Ti/Au	45	–	–	–	MC MoS_2 [126], 2013
10SL **MoS_2**	C_8H_8O 400	Н	4×10^3	In_2O_3-SnO_2	Gr	Gr	3–6	–	–	$(3–5)\times10^4$	MC MoS_2 [127], 2013
FL **MoS_2**	Al_2O_3 ~25	В	1×10^3	Ti/Au	Ti/Au	Ti/Au	170	42	50	10^7	MC MoS_2 [128], 2014
1SL **MoS_2**	Al_2O_3 25	В	300	Ni/Au	Ag/Au	Ag/Au	24	–	–	10^7	CVD MoS_2 [132], 2015
1SL **MoS_2**	(ALD) Al_2O_3 10	В	150	Ti/Au	Ti/Au	Ti/Au	81,6	20	11,4	10^8	CVD MoS_2 [137], 2017
1SL **MoS_2**	(ALD) HfO_2 30	В	1×10^4	Au	Au	Au	70	–	–	–	CVD MoS_2 [138], 2018
10SL **$MoSe_2$**	SiO_2 270	Н	$9,4\times10^3$	p^+-Si	Ti/Au	Ti/Au	250	–	–	$> 10^6$	MC $MoSe_2$ [139], 2014
10SL **$MoSe_2$**	SiO_2 90	Н	2×10^3	Si	Ni	Ni	35	–	–	$10^4 \div 10^6$	MC $MoSe_2$ [140], 2015
FL(25нм) **$MoSe_2$**	SiO_2 300	Н	5×10^3	p^+-Si	Ti/Au	Ti/Au	50	–	–	10^5	MC $MoSe_2$ [142], 2018
(6-44)SL **$MoTe_2$**	SiO_2 285	Н	2×10^3	n^+-Si	Ti/Au	Ti/Au	~ 6	–	–	10^5	MC $MoTe_2$ [143], 2014
FL **WS_2**	SiO_2 300	Н	$4,8\times10^3$	Si^{++}	Au	Au	234	–	–	10^8	MC WS_2 [147], 2014

1SL **WS_2**	SiO_2(300)+ h-BN(6,8)	H	~ 2×10^3	Si^{++}	Al/Au	Al/Au	214	–	–	10^7	MC WS_2 [149], 2015
1SL **WSe_2**	SiO_2(300)+ h-BN(317)	H	–	Si	Ti/Pd	Ti/Pd	31	–	–	5×10^8	CVD WSe_2 [153], 2016
1SL **$Mo_{1-x}W_xSe_2$** x = 0,14 x = 0,33 x = 0,39	SiO_2 300	H	–	Si	Ti/Au	Ti/Au	 2×10^{-3} 1×10^{-3} 8×10^{-3}	–	–	$> 10^5$	MC MoWSe [158], 2014
FL **ZrS_2**	$BN+SiO_2$ –	H	~2×10^3	Si	Ti/Pt	Ti/Pt	~1,1	–	–	–	LP CVD ZrS_2 [159], 2015
FL **$ZrSe_2$**	SiO_2 90	H	520	p^+-Si	AlO_x- Cr-Au	AlO_x- Cr-Au	0,1	–	–	10^5 (300K) 10^7 (77K)	MC $ZrSe_2$ [162], 2017
4SL **HfS_2**	SiO_2 –	H	–	p^+-Si	Au	Au	7,6	–	–	10^8	CVD HfS_2 [165], 2017

Окончание табл. 2

Элементы транзистора							Параметры транзистора				Способ изготовления материала канала. Лит-ра, год публикации
Число монослоев, материал канала	Затвор				Исток	Сток	подвижн. в канале $см^2/В\cdot с$	f_T, ГГц	f_{max}, ГГц	Отношение ON/OFF	
	подзатворн. диэлектрик, толщина (нм)	верх.В или нижн. Н	длина (нм)	материал электрода затвора	материал электрода истока	материал электрода стока					
FL **$HfSe_2$**	SiO_2 90	H	~$2,5\times10^3$	p^+-Si	AlO_x- Cr-Au	AlO_x- Cr-Au	1÷4	–	–	10^6 (300K) 10^7 (200K)	MC $HfSe_2$ [162], 2017
FL(12,7 нм) **PtS_2**	SiO_2 300	H	10^4	Si^{++}	Cr/Au	Cr/Au	$3,6\times10^{-3}$	–	–	$< 10^2$	CVD PtS_2 [169], 2019
FL(2,0 нм) **$PtSe_2$**	SiO_2 270	H	~2×10^3	Ion gel	Pd	Pd	3	–	–	$> 10^5$	MC $PtSe_2$ [171], 2018
FL(2,6 нм) **$PtTe_2$**	SiO_2 285	H	–	Si	Cr/Au	Cr/Au	–	–	–	–	CVD $PtTe_2$ [172], 2018
FL(9 нм) **$PdSe_2$**	SiO_2 270	H	~1×10^3	Si	Ti/Au	Ti/Au	216	–	–	~ 10^3	MC $PdSe_2$ [175], 2017
1SL **ReS_2**	SiO_2 285	H	–	Si	Ti/Au	Ti/Au	–	–	–	~ 10^7	MC ReS_2 [178], 2015
10SL **$ReSe_2$**	SiO_2 300	H	$1,2\times10^4$	p-Si	Cr/Au	Cr/Au	400 (e) 20 (h)	–	–	10^7 (e) 10^6 (h)	MC $ReSe_2$ [188], 2018

Примечания: SL – single layer, MC – mechanically cleaved-single layer, FL – few layers, CVD – chemical vapor deposition, ALD – atomic layer deposition.

В качестве поверхности, на которой размещался слой дихалькогенида MX_2, кроме SiO_2 наиболее часто упоминаются покрытия из Al_2O_3 [123], h-BN [126], Si_3N_4 [132], ZrO_2 [190]. Те же диэлектрики вместе с HfO_2 используются для пассивации верхней поверхности 2D-слоя и создания подзатворного изолятора. Важнейшую роль для достижения высокого качества FET играет подбор материала, из которого изготовлены электроды стока и истока, обеспечивающего минимальную высоту энергетического барьера в области перехода 2D-слой – металл. Некоторые конструкции полевых транзисторов на основе дихалькогенидов переходных металлов показаны на рис. 16. В работе [126] в качестве нижнего полевого электрода транзистора на основе MoS_2 использовался графен (Gr), малая толщина которого обеспечивала максимальную гибкость конструкции при размещении ее на гибкой подложке. В работе [129] описан FET, изготовленный полностью из 2D-материалов без применения металлических слоев. Использование в качестве электрода затвора углеродной нанотрубки (CNT) позволило изготовить полевой транзистор на основе MoS_2 с рекордно малой длиной затвора L ≈ 1 нм [190]. Обзорные статьи, посвященные поле-

вым транзисторам на основе дихалькогенидов переходных металлов, опубликованы в работах [192, 193].

Пока сравнительно небольшое количество опубликованных работ посвящено исследованиям по созданию полевых транзисторов на основе трихалькогенидов переходных металлов: HfS_3 [194], ZrS_3 [195], TiS_3 [196–199], $TaSe_3$ [200, 201]. Описанию основных свойств 2D-соединений вида MX_3 (M = Ti, Hf, Zr, Nb, Ta; X = S, Se), а также приборов нано- и фотоэлектроники на их основе посвящен обзор [202]. Структурные, зонные и оптические свойства описаны в работах [203–206]. Теоретические и экспериментальные исследования трихалькогенидов ряда переходных металлов, относящихся к IV-V группам элементов таблицы Д. И. Менделеева, показали что 2D-монослои TiS_3, ZrS_3, $ZrSe_3$, HfS_3, $HfSe_3$, NbS_3 являются полупроводниковыми соединениями с непрямой энергетической щелью, изменяющейся в интервале от 0,8 эВ (для $HfSe_3$) до 1,94 эВ (для HfS_3). 2D-монослои $ZrTe_3$, $HfTe_3$ имеют зонную структуру, характерную для металлов, при этом $ZrTe_3$ может трансформироваться в непрямозонный полупроводник ($E_g \simeq 0{,}1$ эВ) под действием механических деформаций.

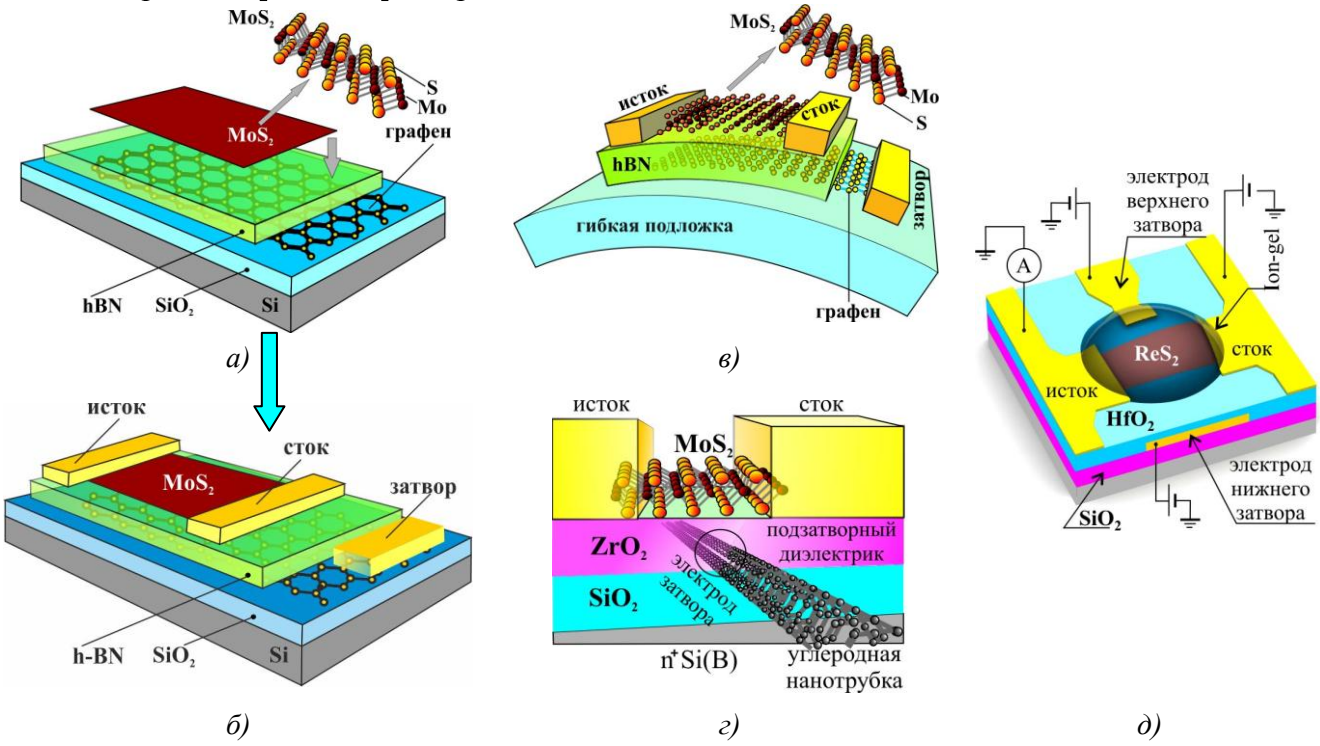


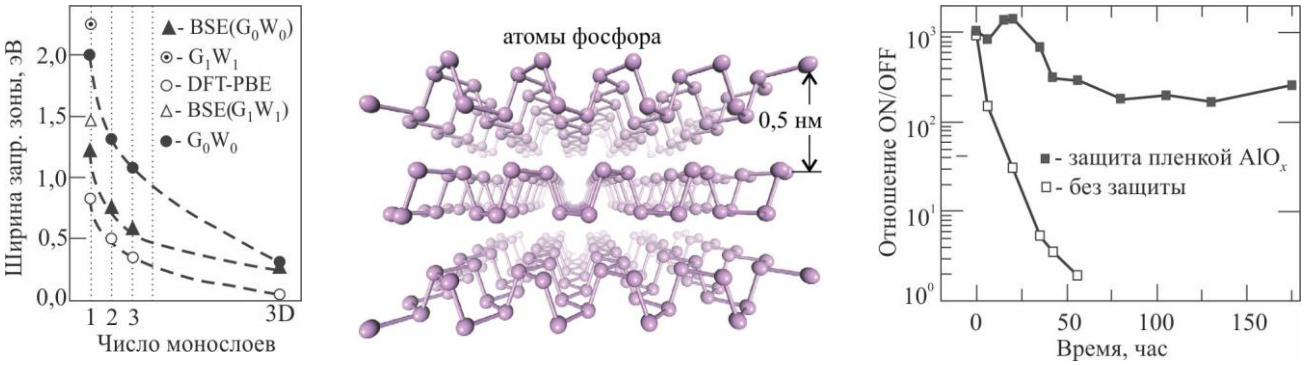
Рис. 16. Конструкции полевых транзисторов на основе дихалькогенидов переходных металлов: а) – слои материалов в FET на основе MoS_2; б) – та же транзисторная структура в сборе [126]; в) – та же транзисторная структура на гибкой подложке [126]; г) – FET с углеродной нанотрубкой в качестве электрода затвора [190]; д) – FET на основе ReS_2 с полевым затвором из полимера [191].

2D-монослой трисульфида титана TiS_3 имеет прямую энергетическую щель, равную 1,02 эВ и слабо меняющуюся в широком интервале одно- и двухосных деформаций. Как показал теоретический расчет [206], в определенном кристаллографическом направлении подвижность электронов в 2D-монослое TiS_3 может достигать величин, превышающих 10^4 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$, а подвижность дырок – более 10^3 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$, что выше соответствующих значений для 2D-MoS_2. 2D-монослой NbS_3 – полупроводник с непрямой энергетической щелью ($E_g \simeq 1{,}18$ эВ), которая умеренно изменяется под воздействием деформаций. С использованием нанолент из TiS_3 в качестве материала полевого канала были изготовлены полевые транзисторы со значениями отношения ON/OFF от 5 до 10^4 и подвижностями в канале от нескольких единиц до более чем 70 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ [196–199]. Приборы изготавливались вышеописанными способами на подложках SiO_2/Si с использованием сток-истоковых электродов из Ti/Au и

с нижним полевым электродом. Пассивация 2D-монослоя трихалькогенида в канале FET диэлектриками типа Al_2O_3 увеличивает подвижность носителей. В работах [200, 201] отмечена перспективность использования нанонитей из $TaSe_3$ для создания электрических межсоединений, способных выдерживать без пробоя токи порядка $10^6 \div 10^7$ А·см$^{-2}$. Трихалькогениды переходных металлов из группы VI (Mo, W) по литературным данным [202] к настоящему времени синтезированы в аморфной форме и проявляют полупроводниковые свойства.

2.3 Транзисторы на основе моноатомных 2D-материалов VA и IVA групп элементов таблицы Д. И. Менделеева

2.3.1 Фосфорен: Фосфорен (bP – black phosphorous) или 2D-слой α-фазы фосфора является прямозонным полупроводником с шириной прямой энергетической щели $E_g^{dir}(\Gamma \uparrow \Gamma) =$ = 1,5–2,5 эВ, которая оставаясь прямой, уменьшается по мере увеличения числа монослоев, стремясь к значению 0,3 эВ, характерному для объемного 3D-материала этой аллотропной формы (рис. 17, *а*). Среди многочисленных известных аллотропных модификаций фосфора – это одна из форм, наиболее термодинамически устойчивых при комнатных температурах. Подвижности электронов и дырок анизотропны и теоретически могут достигать значений порядка 10^3 и 10^4 см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$, соответственно [207]. Фосфорен активно взаимодействует с парами воды и атмосферным кислородом, из-за чего структуры на его основе требуют специальной защиты и пассивации (рис. 17, *в*). Высокая подвижность, наличие запрещенной зоны и возможность управления ее шириной путем изменении числа монослоев или внешней механической деформацией, заметная фотопроводимость в диапазоне 3÷5 мкм обусловили интерес разработчиков фото- и наноэлектроники к этому квазидвумерному материалу [216]. Исследованиям полевых нанотранзисторов на основе фосфорена посвящены работы [208–234]. В качестве покрытий для защиты канала или слоя подзатворного диэлектрика FET исследовались тонкие слои AlO_x, SiO_2, PO_x, HfO_2, $(C_5O_2H_8)_n$, C8-BTBT ($C_{30}H_{40}S_2$), полимерные покрытия (P(VDF-TrFE) – poly(vinylidenefluoride-trifluoroethylene) с ферроэлектрическими свойствами [214], двухслойные диэлектрики типа BN-Al_2O_3 (рис. 18). В случае использования покрытия из C8-BTBT в FET с каналом из многослойного фосфорена было реализовано отношение ON/OFF ~ 10^7 (подзатворный диэлектрик из SiO_2) [228]. При использовании в качестве подзатворного диэлектрика HfO_2 (d_{ox} = 21 нм) был получен FET со значениями пороговой (f_T) и максимальной (f_{max}) частот 12 и 20 ГГц, соответственно [212]. Свойства полевых транзисторов с каналом на основе многослойного фосфорена приведены в табл. 3.



а) *б)* *в)*

Рис. 17. Кристаллическая решетка и некоторые свойства α-фосфорена: а) – зависимости ширины запрещенной зоны от числа монослоев, рассчитанные с использованием нескольких методов (G_oW_0, DFT и др.) [216]; б) – кристаллическая решетка фосфорена, состоящего из трех монослоев 2SL-bP [210]; в) – деградация отношения ON/OFF со временем в полевом транзисторе на основе фосфорена при наличии защиты канала и без него [216].

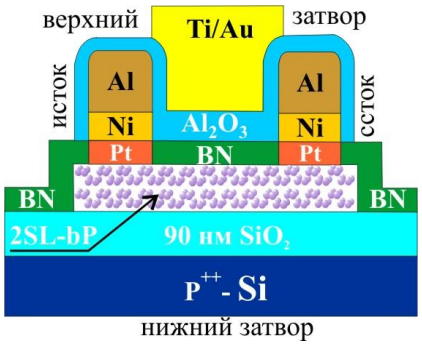


Рис. 18. Полевой транзистор на основе двухслойного α-фосфорена (2SL-bP) с двухслойным подзатворным диэлектриком BN-AL_2O_3 (L_{ch} = 200 нм, ON/OFF ~ 10^3÷10^5) [221].

Таблица 3

Устройство и основные параметры полевых нанотранзисторов (FET) на основе моноатомных 2D-материалов из элементов групп VA и IVA таблицы Д. И. Менделеева

Элементы транзистора							Параметры транзистора				Способ изготовления материала канала FET (слой защитного покрытия от внешних воздействий) Лит-ра, год публикации
Число монослоев, материал канала	Затвор: подзатворн диэлектрик толщ. (нм)	Затвор: верх.В или нижн. Н	Затвор: длина (нм)	Затвор: материал электрода затвора	Исток: материал электрода истока	Сток: материал электрода стока	подвижн. в канале $см^2/В·с$	f_T, ГГц	f_{max}, ГГц	Отношение ON/OFF	
Элементы группы VA: FET на основе фосфорена (**bP**)											
FL-**bP** (1,9 нм)	SiO_2 20	H	$2×10^3$	Si^{++}	Ti	Ti	38 (e) 172 (h)	–	–	$> 10^4$	MC-bP (слой Al_2O_3) [208], 2014
FL-**bP** (6–10 нм)	HfO_2 21	B	300	–	Ti/Pd/ Au	Ti/Pd/ Au	400	12	20	$2×10^3$	MC-bP (слой HfO_2) [212], 2014
FL-**bP** (15 нм)	Al_2O_3 25	H	$2,7×10^3$	Si^{++}	Ti/Pd	Ti/Pd	89 (e) 310 (h)	–	–	10^3–10^4	MC-bP (слой Al_2O_3) [217], 2015
FL-**bP** (10 нм)	HfO_2 15	H	$3×10^3$	Si^{++}	Ni	Ni	413 (h)	–	–	–	MC-bP (слой SiO_2) [213], 2015
FL-**bP**	HfO_2 5	H	$3×10^3$	Si^{++}	Ni	Ni	> 400 (h)	–	–	~ 10^2	MC-bP (слой PMMA) [218], 2016
FL-**bP**	Al_2O_3+ PO_x	B	–	Ti/Au	Ti/Au	Ti/Au	115	–	–	> 300	MC-bP (слой PO_x) [221], 2018
FL-**bP**	SiO_2 300	H	300–1500	Si^{++}	Pt/Au	Pt/Au	250–600	–	–	10^4 10^7	MC-bP (слой C8-BTBT) [222], 2018
FET на основе арсенена (**bAs**), висмутена (2D**Bi**)											
FL-2D**As**	SiO_2 300	H	$2×10^3$	Si^{++}	Au	Au	59	–	–	~ 10^5	MC-2DAs (природн. мин.) [244], 2018
FL-2D**Bi** (111)	SiO_2 300	H	$3×10^4$	Si^{++}	Au	Au	220	–	–	≤ 10	PLD-Bi(111) [245], 2019
FET на основе элементов группы IVA: силицен (2D**Si**) и германана (2D**GeH**)											
1SL-2D**Si**	SiO_2 90	H	$1,8×10^3$	p-Si^+	Ag	Ag	100	–	–	~ 10	SEDNE [249], 2015
FL-2D**Si** (10–24)	SiO_2 95	H	–	p-Si^+	Ag	Ag	200	–	–	1,5	SEDNE (модифиц.) [252], 2017
FL-2D**GeH** (60 нм)	SiO_2 300	H	–	p-Si^+	Ti/Au	Ti/Au	70 (300 K) 150 (77 K)	–	–	10^4 (300 K) 10^5 (77 K)	MC-2DGeH [271], 2017

Примечания: 1SL – single layer; FL – few layer; MC – mechanically cleaved-single layer; PLD – pulsed laser deposition; PMMA – полиметилметакрилат $(C_5O_2H_8)_n$; C8-BTBT – 2,7-Dioctyl[1]benzothieno[3,2-b][1]benzothiophene, эмпирическая формула $C_{30}H_{40}S_2$; SEDNE – процесс «silicene-encapsulated delamination with native electrode» [249].

2.3.2 Антимонен (Sb), арсенен (As), висмутен (Bi): Помимо фосфора в форме квазидвумерных 2D-материалов, принадлежащих к VA группе элементов таблицы Д. И. Менделеева, известен ряд термодинамически устойчивых аллотропных модификаций сурьмы (2D-антимонен, Sb), мышьяка (2D-арсенен, b-As) и висмута (2D-висмутен, Bi). Монослои β-арсенена и β-антимонена – широкозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны 2,47 и 2,38 эВ [235–237]. Монослои висмутена – сравнительно узкозонные полупроводники (0,8-0,075 эВ), проявляющие свойства топологических изоляторов. Важным достоинством этих материалов является стабильность параметров в условиях влаго- и кислородсодержащей среды. Анализ параметров FET, теоретически достижимых при использовании арсенена, антимонена и висмутена в качестве материала полевых каналов, проведен в работах [235–243]. Показано, что подвижности электронов и дырок в канале полевых транзисторов на основе монослоев арсенена могут достигать значений 635 и $1{,}7\times10^3$ $см^2\cdot В^{-1}\cdot с^{-1}$, а на основе антимонена значений 630 и $1{,}737\times10^3$ $см^2\cdot В^{-1}\cdot с^{-1}$, соответственно [237]. Теоретически в транзисторах на основе арсенена с субнанометровыми длинами каналов отношение ON/OFF может достигать значения $\sim 8{,}8\times10^7$ [235]. Экспериментально реализованные значения параметров FET на основе арсенена и висмутена приведены в работах [244, 245] (табл. 3). Исследованию влияния деформаций, электрического поля, легирования и адсорбции внешних адатомов посвящена обзорная работа [238].

2.3.3 Силицен (2DSi), германен (2DGe), станен (2DSn), плюмбен (2DPb): В свободном состоянии 2D-монослои кремния (силицен), германия (германен), олова (станен) и висмута (висмутен) имеют металлическую проводимость. Для создания энергетической щели в монослоях 2DSi при изготовлении FET исследовались различные способы, описанные в литературе (см. обзор [246]. В нанолентах силицена с шириной 10–20 нм при определенном расположении граничных атомов кремния из-за эффекта размерного квантования в спектре может образовываться энергетическая щель с шириной, зависящей от ширины наноленты. Расчеты, проведенные в работах [258–260], показали возможность достижения значения ON/OFF ~ 10^6 в FET с длиной канала 4,4÷11,5 нм на основе наноленты силицена со структурой «armchair-edged» (ASiNRs). Однако, технология изготовления очень узких нанолент на основе силицена пока заметно ухудшает параметры переноса носителей в канале полевых транзисторов [246]. Приложение внешнего вертикального электрического поля $E_\perp \sim 1В/\overset{0}{А}$ в транзисторе с верхним и нижним полевыми электродами и длиной канала L ~ 7 нм может создать энергетическую щель $E_g \approx 0{,}14$ эВ. По расчетам это позволяло реализовать отношение ON/OFF не выше 4, что связывалось с высоким уровнем туннельной утечки в закрытом состоянии FET [247]. Исключение туннелирования в транзисторах с полевым каналом на основе полупроводникового силицена по расчетам [248, 249] способно обеспечить значение ON/OFF ~ 10^6. Применение процесса функциализации поверхности силицена атомами натрия (Na) также приводит к появлению энергетической щели с шириной порядка 0,5 эВ и по оценкам [250] может обеспечить значение ON/OFF ~ 4×10^8. Этот процесс не только не приводит к ухудшению параметров переноса носителей в канале FET, но и в зависимости от типа адатомов способен менять тип проводимости монослоев силицена [246, 250]. Однако, такие полевые транзисторы требуют использования повышенного напряжения $V_{ds} \sim 30$ В. Третий способ, позволяющий открыть в спектре силицена энергетическую щель без ухудшения параметров переноса в канале FET – создание в гексагональной периодической структуре монослоя силицена точечных дефектов в виде «дырок» гексагональной формы, как показано на рис. 19 (структура «silicene nanomesh», SNM), где разорванные связи обычно пассивируются водородом. Анализ, проведенный в работе [251], показал, что в монослое SNM может быть получена энергетическая щель $E_g \approx 0{,}68$ эВ. По расчетам, в полевом нанотранзисторе из такого материала с каналом длиной L ~ 9 нм при низких температурах можно достичь значения

ON/OFF ~ $5{,}1\times10^4$ при относительно низких напряжениях V_{ds} ~ 0,5 В. Однако, значение ON/OFF резко уменьшается до 100 при повышении рабочей температуры до комнатной. Успешное изготовление полевого транзистора на основе монослоя силицена было проведено в 2015 году и связано с использованием нового метода (рис. 20), получившего название «silicene-encapsulated delamination with native electrodes» (SEDNE), когда эпитаксиально выращенный на подложке Ag(111)/слюда монослой 2DSi вместе с Ag(111) механически отслаивался от слюдяной подложки и переносился на подложку SiO_2/p^{++}-Si, после чего из оказавшегося сверху подслоя Ag формировались электроды стока-истока [249, 252]. Сильное взаимодействие монослоя силицена с Ag(111) обеспечивало переход силицена из металлического в полупроводниковое состояние [253]. Экспериментально наблюдаемые при комнатной температуре параметры FET на основе силицена приведены в табл. 3. Обзор свойств силицена и транзисторов с полевым каналом на его основе опубликован в работах [246, 254–257]. Подвижность в полевом канале таких транзисторов при комнатной температуре лежит в пределах 100–200 $см^2\cdot В^{-1}\cdot с^{-1}$, что существенно ниже теоретически возможных значений 1200 $см^2\cdot В^{-1}\cdot с^{-1}$ [261]. Однако, силицен и германен по-прежнему привлекают внимание специалистов благодаря своей совместимости с кремниевыми технологиями, хорошо отработанными для ультратонких 3D-материалов, туннельным свойствам, более сильному по сравнению с графеном спин-орбитальному взаимодействию. Исследуются процессы их синтеза на различных металлических и др. подложках, в том числе на Ir(111), ZrB_2(0001), Ag(111), ZrC(111), MoS_2, AlN, Au(111) и др. [246, 262].

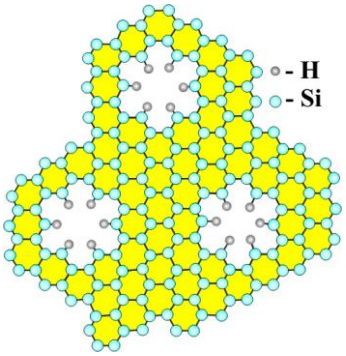
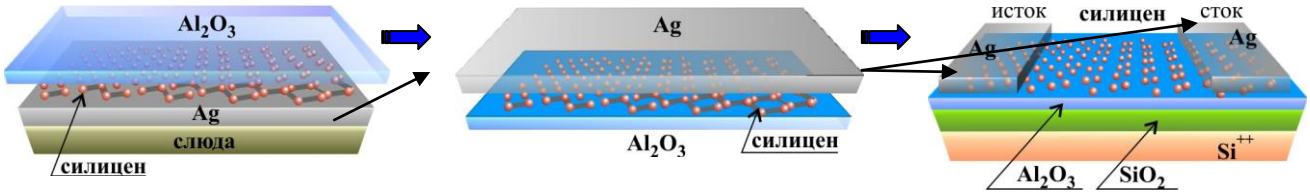


Рис. 19. Фрагмент кристаллической решетки «silicene nanomesh» (SNM) [251].



а) *б)* *в)*

Рис. 20. Основные стадии изготовления FET с силиценовым каналом по процессу SEDNE [249]: а) – капсулирование монослоя силицена, выращенного на подложке Ag(111)/слюда, при помощи покрытия из Al_2O_3; б) – механическое отслоение слюдяной подложки; в) – перенос структуры Ag-силицен-Al_2O_3 на подложку SiO_2/p^{++}-Si и изготовление электродов стока-истока из слоя Ag(111).

К числу способов, активно развиваемых для создания энергетической щели, относится функциализация поверхности моноатомных 2D-материалов атомами водорода с образованием соединений Si_2H_2 (E_g = 2,11 эВ), Ge_2H_2 (E_g = 0,95 эВ), Sn_2H_2 (E_g = 0,45 эВ) или атомами фтора – Si_2F_2 (E_g = 0,70 эВ), Ge_2F_2 (E_g = = 0,19 эВ) [263, 264]. Фторирование станена не приводит к появлению энергетической щели, оставляя 2D-Sn_2F_2 бесщелевым полупроводником. Малая эффективная масса электронов (m_e^* ~ $0{,}1m_0$) в германане (2D-Ge_2H_2), обуславливающая возможность реализации чрезвычайно высокой подвижности (> $1{,}8\times10^4$ $см^2\cdot В^{-1}\cdot с^{-1}$) вкупе с достаточно широкой энергетической щелью, выдвигают этот материал в число весьма перспективных при создании полевых нанотранзисторов [265]. Плюмбен (2DPb) в свободном состоянии имеет энергетическую щель шириной 0,421 эВ [266]. В случае функциализации плюмбена атомами H, F, Cl, Br, I в энергетическом спектре образуются щели разной ширины: PbH (E_g = 0,983 эВ), PbF (E_g = 1,071 эВ), PbCl (E_g =

= 0,902 эВ), PbBr (E_g = 0,847 эВ), PbI (E_g = = 0,693 эВ) [266], что также свидетельствует о необходимости исследования возможностей применения этих материалов в качестве полевых каналов FET. Теоретические оценки предельно достижимых параметров транзисторов на основе 2D-Ge_2H_2 и 2D-Si_2H_2 приведены в работах [267–270]. Экспериментально полученные свойства FET из германана обсуждаются в работе [271]. Свойства висмутена, функциализованного различными адатомами, описаны в монографии [272].

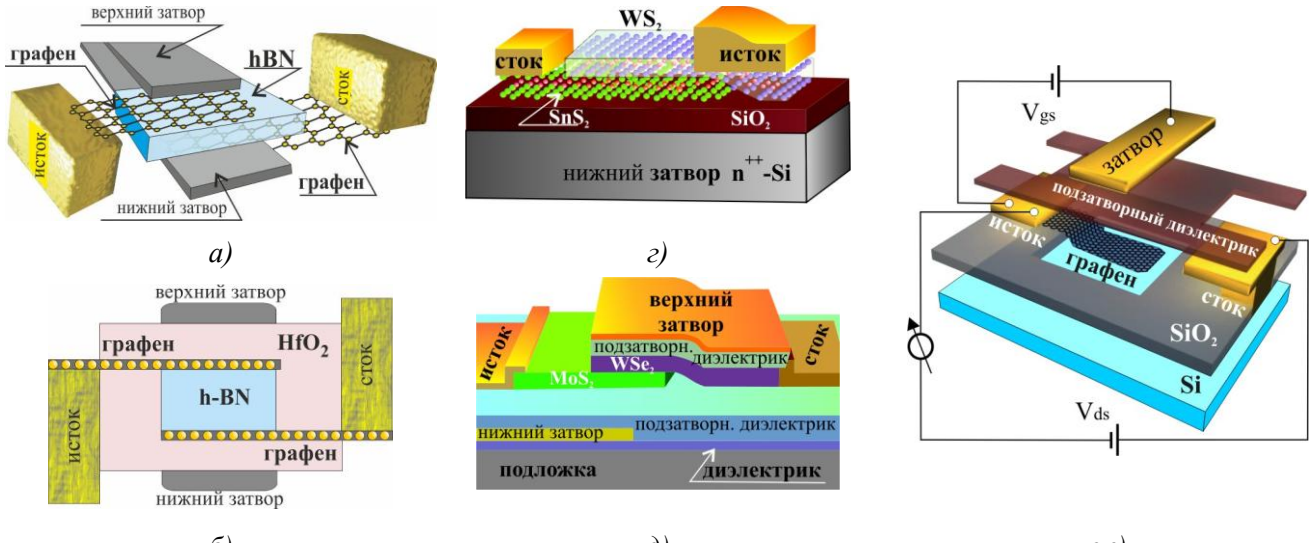
2.4 Транзисторы на основе гетероструктур 2D-материалов

Как известно, впервые идея использования гетероперехода в полупроводниковой электронике была выдвинута У. Шокли (W. Shockley, 1910–1989) в 1951 году (W. Shockley, US Patent 2,569,347; September 25, 1951). К настоящему времени многофазные гетеросистемы, построенные с использованием различных 3D-материалов, сформировались в чрезвычайно обширный класс и служат основой огромного числа современных электронных приборов. Гетеропереходы на основе 2D-структур с управляемой шириной запрещенной зоны, свойствами туннелирования и т. п. могут лечь в основу создания полевых транзисторов с широким спектром новых свойств [273, 274].

В качестве компонентов гетеропар для полевых нанотранзисторов с каналами на их основе исследованы различные 2D-материалы: Gr/(h)BN [51, 275–278], Gr/(h)BCN [279, 280], Gr/F:Gr (гетеропара графен-флюрографен) [281], Gr/SiO_2-Al_2O_3 [282, 283], Gr/H:Si [284], Gr/MoS_2 [285], Gr/WS_2 [286], MoS_2/WTe_2 [287], MoS_2/HfS_2 [288], MoS_2/$PdSe_2$ [289], (1T)MoS_2/(2H)MoS_2 [290, 291], MoS_2/bP [292, 293], WS_2/SnS_2 [294], WSe_2/$SnSe_2$ [295], WSe_2/MoS_2 [296], WSe_2/WO_x [153], PtS_2/$PtSe_2$ [297], ZrS_2/SnS_2 [298], SnS_2/bP [299].

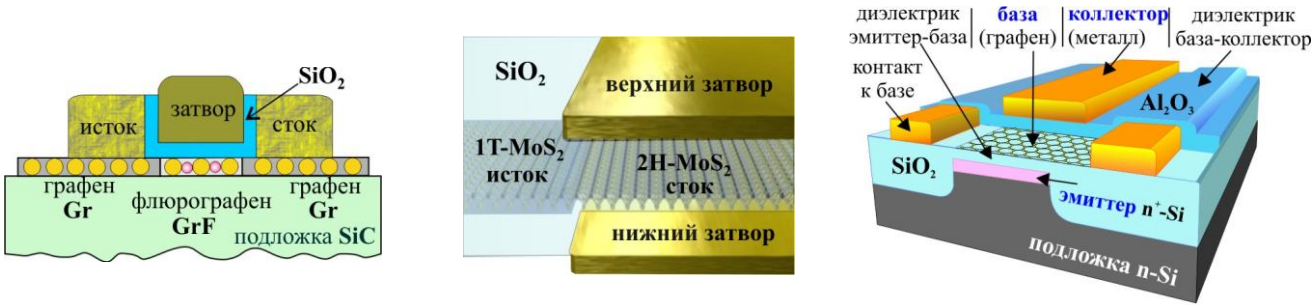
Использование сверхтонких слоев 2D-материалов при создании гетероструктур сулит новые возможности по сравнению с гетеропарами из обычных 3D-материалов. Например, из-за более слабой Ван-дер-Ваальсовой связи между слоями в 2D-структурах, в случае образования дефектов на межфазной поверхности их плотность должна быть ниже. По той же причине взаимная диффузия химических элементов, составляющих различные гетеропары, должна быть слабее. Гетеропары, образованные вертикальным наложением слоев двух разных 2D-материалов, не так чувствительны к рассогласованию параметров кристаллических решеток, что в свою очередь обеспечивает более низкую плотность центров рекомбинации носителей зарядов, чем в гетероструктурах из объемных 3D-материалов.

В настоящее время различными авторами предложено и исследовано несколько конструкций нанотранзисторов, показанных на рис. 21, где в качестве материала полевых каналов используются 2D-гетероструктуры.



а) *г)*

б) *д)* *ж)*



в) *е)* *з)*

Рис. 21. Структуры полевых нанотранзисторов, содержащих гетеропереходы на основе 2D-материалов: а) – с вертикальной гетеропарой Gr/(h)BN (VH-FET) [278]; б) – та же структура [278] (поперечная проекция); в) – с продольно расположенной гетеропарой Gr/F:Gr (LH-FET) [281]; г) – туннельный транзистор с вертикальной гетеропарой WS_2/SnS_2 (VH-TFET) [294]; д) – туннельный транзистор с вертикальной гетеропарой WSe_2/MoS_2 (VH-TFET) [296]; е) – с продольно расположенной гетеропарой (1T)MoS_2/(2H)MoS_2 (LH-TFET) [291]; ж) – вертикальный барристор с гетеропарой Gr/H:Si [284]; транзистор с базой из графена (GBT) и гетеробарьерами между графеном и диэлектриками из Al_2O_3 и SiO_2 [283].

В подзатворном пространстве транзисторов могут помещаться 2D-материалы с шириной запрещенной зоны бóльшей, чем у 2D-материалов, расположенных в областях истока и стока. В зависимости от взаимного расположения 2D-слоев гетеропары, конструкции транзисторов можно условно отнести либо к «вертикальному» (рис. 21, *а*, *б*, *г*, *д*, *ж*), либо к «горизонтальному» (рис. 21, *в*, *е*) типам (VH- либо LH-FET). В обоих случаях сток и исток разделены одним или несколькими энергетическими гетеробарьерами, высота которых модулируется напряжением затвора. В вертикальном барристоре (рис. 21, *ж*) высота барьера Шоттки между полуметаллическим истоком и полупроводниковым стоком также управляется напряжением затвора. «Вертикальные» конструкции гетеро-FET могут быть реализованы с применением метода микромеханического расщепления слоистых 2D-материалов. Методы изготовления гетеро-FET с «горизонтальной» конструкцией находятся в стадии поиска и оптимизации и требуют прецизионной технологии изготовления приграничных областей соприкасающихся 2D-слоев. Реализованные к настоящему времени основные параметры нанотранзисторов, содержащих гетеропереходы на основе 2D-материалов, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Устройство и основные параметры полевых нанотранзисторов (FET), на основе гетеропар 2D-материалов

Элементы транзистора							Параметры транзистора		Способ изготовления материала канала FET Лит-ра, год публикации
2D-гетероара тип транзистора	Затвор				Исток	Сток	подвижн. в канале $см^2/В{\cdot}с$	отношение ON/OFF	
	подзатворн диэлектрик толщ. (нм)	верх.В или нижн. Н	длина (нм)	материал электрода затвора	материал электрода истока	материал электрода стока			
WSe_2 – WO_{3-x} FET	SiO_2 + BN	Н	–	Si	Ti/Pd	Ti/Pd	51	5×10^8	WSe_2 (CVD, PVD) WO_{3-x} (отжиг 250 °С) [153], 2016
$SnSe_2$ – WSe_2 VH-TFET	Al_2O_3 40	Н	–	Si	Cr/Au	Cr/Au	–	~ 10^6	WSe_2, $SnSe_2$ (MC) [295], 2017
Gr – (h)BN VH-FET	SiO_2 100	Н	4×10^4	p^+-Si	Cr/Au	Cr/Au	$(3,6–7)\times10^3$ (e) $(3,9–7,2)\times10^3$(h)	–	Gr, (h)BN (LP CVD) [277], 2017
SnS_2 – WS_2 VH-TFET	SiO_2 300	Н	–	n-Si	Pt	Ti	–	~ 10^6	n-SnS_2, p-WS_2 (MC) [294], 2018
HfS_2 – MoS_2 VH-FET	Al_2O_3 25	Н	–	Cr/Au/ /n^+-Si	Ti/Pd/ /Au	Ti/Pd/Au	–	~ 10^4	HfS_2, MoS_2 (MC) [288], 2018

$PdSe_2$ – MoS_2 VH-FET	SiO_2 –	H	5×10^3	Si	Ti/Au	Ti/Au	139 (e) 57 (h)	10^3	$PdSe_2$, MoS_2 (MC) [289], 2019
Gr – WS_2 VH-FET	SiO_2 90-290	H	–	Si	Cr/Au	Cr/Au	–	~ 10^6	Gr (CVD, WS_2 (MC) [286], 2012
Gr – (h)BC_2N LH-FET	SiO_2 ~ 1	B	7	–	Gr	Gr	–	> 10^4	BC_2N (E_g = 1,6 эВ, χ = 3,3 эВ, BC = 0,95 эВ, BV = 0,64 эВ) [280], 2012
Gr –FGr LH-FET	SiO_2 30	B	150÷ 250	Ti/Pt/ Au	Gr	Gr	2×10^3	~ 10^5	Gr (CVD, подложка 6H-SiC), FGr (XeF_2 70 °C 12÷24 ч) [281], 2013

Примечания: WSe_2 – WO_{3-x} – гетеропары, полученные в матрице WSe_2 (гексагональная решетка) при нагреве в воздушной среде (150–250 °C с образованием областей WO_{3-x} (кубическая решетка); CVD – chemical vapor deposition, PVD – physical vapor deposition, MC – mechanical cleaved, χ – сродство к электрону, BC – высота барьера для электронов, BV – высота барьера для дырок, LP CVD – Low pressure chemical deposition.

3. Заключение

Известный закон Мура предсказывает увеличение вычислительной мощности компьютеров приблизительно вдвое в течение каждых полутора лет. Это требует столь же регулярного роста миниатюризации и повышения быстродействия элементной базы полупроводниковой электроники, прежде всего полевых транзисторов и др. Вместе с тем, как считают многие специалисты, технологические возможности современной электроники фактически подходят к своему физическому пределу. Даже в случае перехода к 10-нм проектной норме крайне усложняется высокоточное совмещение наноэлементов в изготавливаемых схемах, не говоря уже о переходе к уровню топологических норм 2–1,5 нм, который по прогнозу IRDS ожидается к 2030 году. Кроме уменьшения размеров элементов в цифровой электронике все острее становится проблема снижения времени и энергии переключения (<< 0,1 нс и < 1 нДж, соответственно).

Последнее десятилетие связано с активным поиском различных решений вышеназванных проблем. Одним из них являются исследования по использованию двумерных и квазидвумерных материалов и структур для изготовления полевых нанотранзисторов, обзору которых посвящена настоящая статья. Можно констатировать весьма заметный прогресс при создании лабораторных образцов FET на основе монослойного MoS_2 (ON/OFF > 10^8), WSe_2 (ON/OFF ~ 5×10^8), туннельных FET и транзисторов на гибких подложках. Вместе с тем, эти результаты по большей мере лишь доказывают физическую возможность использования исследованных 2D-материалов в технологиях электроники, но никак не свидетельствуют о создании способов их промышленного применения. В частности это связано с отсутствием надежных и недорогих технологий получения рассматриваемых 2D-материалов (за исключением, может быть, графена) на подложках с размерами, сравнимыми с кремнием, арсенидом галлия, фосфидом индия и др. при сохранении их уникальных электрофизических свойств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-20080.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ponomarenko V. P., *Quantum Photosensorics* (Orion R&P Association, Moscow, 2018. – 648 p.) [in Russian].

2. *Carbon nanotubes and graphene for photonic applications*. Eds. by S. Yamashita, Y. Saita, and J.H. Choi (WP Publishing, Oxford, Cambridge, Philadelphia, New York, 2013).

3. *Graphene Optoelectronics. Synthesis, Characterization, Properties, and Applications*. Ed. A. Rashid bin Mohd Yusoff (Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2014).

4. Serhii Shafraniuk. *Graphene. Fundamentals, Devices, and Applications* (Pan Stanford Publishing, 2015).

5. *Carbon Nanomaterials Sourcebook*. Vol. II. Ed. K. D. Sattler (CRC Press, Boen Raton, London, New York,

2016).

6. *2D Materials for Nanoelectronics*. Eds. M. Houssa, A. Dimoulas, A. Molle (CRC Press, Boen Raton, London, New York, 2016).

7. *Two-Dimensional Materials – Synthesis, Characterization and Potential Applications*. Ed. P. K. Nayak (Published in Tech, Croatia, 2016).

8. *Graphene Photonics, Optoelectronics, and Plasmonics*. Eds. Q. Bao, H.Y. Hoh, Y. Zhang (Pan Stanford Publishing, Singapore, 2017).

9. Nan Guo. *Infrared Photodetectors Based on Low-Dimensional Materials* (Springer Nature Singapore Pte Ltd., Beijing, China, 2018).

10. Ng L. W., Hu G., Howe R. C. T., Zhu X., Yang Z., Jones C. G., Hasan T. *Printing of Graphene and Related 2D Materials* (Springer Int. Publ. AG, Switzerland, 2019).

11. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Popov S. V., Chepurnov E. L. // Usp. Prikl. Fiz. **7** (1), 10 (2019).

12. Novaya mezhdunarodnaya marshrutnaya karta raz-vitiya poluprovodnikovyh priborov, Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika **8** (6631), 4–9 (2017).

13. Perspektivy razvitiya tekhnologij vedushchih postavshchikov logiki i kremnievyh zavodov, Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika **6** (6680), 16–19 (2019).

14. Schwierz F. // Proceedings of the IEEE, **101** (7), 1567 (2013).

15. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. // Science, **306**, 666 (2004).

16. Lemme M. C., Echtermeyer T. J., Baus M., Kurtz H. // IEEE Electron Device Lett. **28** (4), 282 (2007).

17. Meric I., Han M. Y., Young A. F., Ozyilmaz B., Kim P., Shepard K. L. // Nature Nanotechnology 2008, doi: 10.1038/nnano.2008.268.

18. Meric I., Baklitskaya N., Kim P., Shepard K. L. // IEDM, 2008, doi: 10.1109/IEDM.2008.4796738.

19. Meric I., Dean C. R., Young A. F., Hone J., Kim P., Shepard K. L. // IEDM, 2010, doi: 10.1109/IEDM.2010.5703419.

20. Kedzierski J., Hsu P.-L., Healey P., Wyatt P. W., Keast C. L., Sprinkle M., Berger C., Walt A. de Heer // IEEE Trans. on Electron Devices, **55** (8), 2078 (2008).

21. Katsnelson Mikhail I. *Graphene: carbon in two dimensions*. Cambridge University Press, N.-Y., 2012.

22. Novoselov K. S. // Phys. Usp. **54** (12), 1227 (2011).

23. Giannazzo F., Greco G., Roccaforte F., Sonde S. S. // Crystals 2018, 8, 70, doi: 10.3390/cryst8020070.

24. Schwierz F., Wong H., Liou J. J., *Nanometer CMOS*. Singapore: Pan Stanford, 2010.

25. Wolf P. // IBM J. Res. Develop. **14**, 125 (1970).

26. Tasker P. J., Hughes B. // IEEE Electron Device Lett. **10**, 7, 291 (1989).

27. Wu Y., Jenkins K. A., Valdes-Garcia A., Farmer D. B., Zhu Y., Bol A. A., Dimitrakopoulos C., Zhu W., Xia F., Avouris P., Lin Y.-M. // Nano Letters, **12**, 3062 (2012).

28. Moon J. S., Curtis D., Hu M., Wong D., McGuire C., Campbell P. M., Jernigan G., Tedesco J. L., VanMil B., Myers-Ward R., Eddy C., Jr., Gaskill D. K. // IEEE Electron. Devices Lett. **30** (6), 650 (2009).

29. Lin Y.-M., Dimitrakopoulos C., Jenkins K. A., Farmer D. B., Chiu H.-Y., Grill A., Avouris Ph. // *Science* **327**, 662 (2010).

30. Han S.-J., Oida S., Jenkins K. A., Lu D., Zhu Y. // IEEE Electron Device Lett. **34**, 1340 (2013).

31. Guo Z., Dong R., Chakraborty P. S., Lourenco N., Palmer J., Hu Y., Ruan M., Hankinson J., Kunc J., Cressler J. D., Berger C., De Heer W. A. // Nano Lett. **13**, 942 (2013).

32. Feng Z. H., Yu C., Li, J., Liu Q. B., He Z. Z., Song, X. B., Wang J. J., Cai S. J. // Carbon. **75**, 249 (2014).

33. Wu Y., Zou X., Sun M., Cao Z., Wang X., Huo S., Zhou J., Yang Y., Yu X., Kong Y., Yu G., Liao L., Chen T. // ACS Appl. Mater. Interfaces **8**, 25645 (2016).

34. Cheng R., Bai J., Liao L., Zhou H., Chen Y., Liu L., Lin Y.-C., Jiang S., Huang Y., Duan X. // Proc. Nat. Acad. Sci. USA 2012;109(29):11588–92.

35. Liao L., Lin Y.-C., Bao M., Cheng R., Bai J., Liu Y., Qu Y., Wang R.L., Huang Y., Duan X. // Nature **467**, 305 (2010).

36. Puurunen R. L. // Journ. Appl. Physics **97**, 121301 (2005).

37. Knez M., Nielsch K., Niinistö L. // Adv. Mater. **19**, 3425 (2007).

38. George S. M. // Rev. **110**, 111 (2010).

39. Ananth Dodabalapur. // Materials Today **9** (4), 24 (2006).

40. Lee J., Tao L., Hao Y., Ruoff R. S., Akinwande D. // Appl. Phys. Lett. **100**, 152104 (2012).

41. Petrone N., Meric I., Hone J., Shepard K. L. // Nano Letters **13** (1), 121 (2013), doi: 10.1021/nl303666m.

42. Meric I., Petrone N., Hone J., Shepard K. L. // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, 2013, doi: 10.1109/MWSYM.2013.6697801.

43. Petrone N., Meric I., Chari T., Shepard K. L., Hone J. // Journ. Electron Devices Society **3** (1), 44 (2015).

44. Wang L., Meric I., Huang P.Y., Gao Q., Gao Y., Tran H., Taniguchi T., Watanabe K., Campos L. M., Muller D. A., Guo J., Kim P., Hone J., Shepard K. L., Dean C. R. // Science **342**, 614 (2013).

45. Chari T., Meric I., Dean C., Shepard K. // IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, doi: 10.1109/TED.2015.2482823.

46. Yeh C.-H., Lain Y.-W., Chiu Y.-C., Liao C.-H., Moyano D. R., Hsu S. S. H., Chiu P.-W. G. // ACS Nano **8** (8), 7663 (2014).

47. Guerriero E., Pedrinazzi P., Mansouri A., Habibpour O., Winters M., Rorsman N., Behnam A., Carrion E. A., Pesquera A., Centeno A., Zurutuza A., Pop E., Zirath H., Sordan R. // Scientific Reports, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-02541-2.

48. Schwierz F., Pezoldt J., Granzner R. // Nanoscale, 2015, doi: 10.1039/C5NR01052G.

49. Sorokin P. B., Chernozatonskii L. A. // Uspekhi Fizicheskikh Nauk **183** (2), 113 (2013).

50. Castro Neto A. H., Guinea F., Peres N. M. R., Novoselov K. S., Geim A. K. // Reviews of Modern Phys. **81**, 109 (2009).

51. Britnell L., Gorbachev R. V., Jalil R., Belle B. D., Schedin F., Mishchenko A., Georgiou T., Katsnelson M. I., Eaves L., Morozov S. V., Peres N. M. R., Leist J., Geim A. K., Novoselov K. S., Ponomarenko L. A. // Science **335**, 947

(2012).

52. Svintsov D., Vyurkov V., Lukichev V., Orlikovsky A., Burenkov A., Oechsner R. // Fizika i Technika Poluprovodnikov **47** (2), 244 (2013).

53. Fiori G., Iannaccone G. // IEEE Electron. Dev. Lett. **30** (3), 261 (2009).

54. Fiori G., Iannaccone G. // IEEE Electron. Dev. Lett. **30** (10), 1096 (2009).

55. Ryzhii V., Ryzhii M., Satou A., Otsuji T., Kirova N. // J. Appl. Phys. **105**, 104510 (2009).

56. Svintsov D., Vyurkov V., Ryzhii V., Otsuji T. // Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 070112 (2011).

57. Alymov G., Vyurkov V., Ryzhii V., Svintsov D. // Scientific Reports, 2016, doi: 10.1038/srep24654.

58. Chae M.-S., Lee T. H., Son K. R., Kim Y. W., Hwangb K.S., Kima T. G. // Nanoscale Horizons 2013, doi: 10.1039/C8NH00374B.

59. Ilatikhameneh H., Klimeck G., Appenzeller J., Rahman R. // IEEE Electron. Dev. Lett. **36** (7), 726 (2015).

60. Lahgere A., Sahu C., Singh J. // Electronics Lett. **51** (16), 1284 (2015).

61. Nigam K., Pandey S., Kondekar P., Sharma D., Verma M., Gedam A. // Micro & Nano Letters **12** (4), 239 (2017).

62. Abedini M., Ziabari S. A. S., Eskandarian A. // International Nano Letters, 2018, doi: 10.1007/s40089-018-0250-6.

63. Xu W., Lee T.-W. // Mater. Horiz. **3**, 186 (2016).

64. Geng Z., Hëahnlein B., Granzner R., Auge M., Lebedev A. A., Davydov V. Y., Kittler M., Pezoldt J., Schwierz F. // Ann. Phys. (Berlin) 2017, 1700033, doi: 10.1002/andp.201700033.

65. Bai J., Duan X., Huang Y. // Nano Lett. **9** (5), 2083 (2009).

66. Li X., Wang X., Zhang L., Lee S., Dai H. // Science **319**, 1229 (2008).

67. Llinas J. P., Fairbrother A., Barin G. B., Shi W., Lee K., Wu S., Choi B. Y., Braganza R., Lear J., Kau N., Choi W., Chen Chen C., Pedramrazi Z., Dumslaff T., Narita A., Feng X., Müllen K., Fischer F., Zettl A., Ruffieux P., Yablonovitch E., Crommie M., Fasel R., Bokor J. // Nature Communications, 2017, doi: 10.1038/s41467-017-00734-x.

68. Hwang W. S., Tahy K., Li X., Huili (Grace) Xing, Seabaugh A. C., Sung C. Y., Jena D. // Appl. Phys. Lett. **100**, 203107 (2012).

69. Bennett P. B., Pedramrazi Z., Madani A., Chen Y.-C., de Oteyza D. G., Chen C., Fischer F. R., Crommie M. F., Bokor J. // Appl. Phys. Lett. **103**, 253114 (2013).

70. Mele D., Mehdhbi S., Fadil D., Wei W., Ouerghi A., Lepilliet S., Happy H., Pallecchi E. // Electronic Materials Letters, 2018, doi: 10.1007/s13391-018-0038-x.

71. Chen Z., Lin Y.-M., Rooks M. J., Avouris P. // Physica E **40**, 228 (2007).

72. Wang Xinran., Ouyang Y., Li X., Wang Hailiang, Guo J., Dai H. // Physical Rev. Lett. **100**, 206803 (2008).

73. Jeong S.-J., Jo S., Lee J., Yang K., Lee H., Lee C.-S., Park H., Park S. // Nano Lett., 2016, doi: 10.1021/acs.nanolett.6b01542.

74. Gholipour M., Masoumi N., Chen Ying-Yu (Christine), Chen D., Pourfath M. // IEEE Trans. on Electron Dev., 2014, doi: 10.1109/TED.2014.2362774.

75. Khatami Y., Kang J., Banerjee K. // Appl. Phys. Lett. **102**, 043114 (2013).

76. Banadaki Y. M., Srivatsava A. // 2013 IEEE 56th Int. Midwest Symp. on Circuits and Systems, doi: 10.1109/mwscas.2013.6674801.

77. Ghadiry M., Ahmad H., Yi C. W., Manaf A. A. // Mater. Express. **6** (3), 265 (2016).

78. Fuechsle M., Miwa G. A., Mahapatra S., Ryu H., Lee S., Warschkow O., Hollenberg L. C. L., Klimeck G., Simmons M. Y. // Nature Nanotechnology **7**, 242 **(**2012).

79. Deshpande V. *Scaling Beyond Moore: Single Electron Transistor and Single Atom Transistor. Integration on CMOS*. Micro and nanotechnologies/Microelectronics. Université de Grenoble, 2012.

80. Nguyen H. C., Retouty M., Lepennetier G. // arXiv:1701.05543v1 [cond-mat.mes-hall] 19 Jan 2017.

81. Xie F., Peukert A., Bender T., Obermair C., Wertz F., Schmieder P., Schimmel T. // Adv. Mater. 2018, 1801225, doi: 10.1002/adma.201801225.

82. Averin D. V., Likharev K. K. Single-electronics: *Correlated transfer of single electrons and Cooper pairs in small tunnel junctions.* In: Mesoscopic Phenomena in Solids, B. Altshuler, P. Lee, and R. Webb, Eds. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1991, pp. 173–271.

83. Soldatov E. S., Khanin V. V., Trifonov A. S., Presnov D. E., Yakovenko S. A., Khomutov G. B. // JETP Lett. **64** (10), 556 (1996).

84. Ponomarenko L. A., Schedin F., Katsnelson M. I., Yang R., Hill E. W., Novoselov K. S., Geim A. K. // Science **320**, 356 (2008).

85. Kim G., Kim S.-S., Jeon J., Yoon S. I., Hong S., Cho Y. J., Misra A., Ozdemir S., Yin J., Ghazaryan D., Holwill M., Mishchenko A., Andreeva D. V., Kim Y.-J., Jeong H. Y., Jang A-R., Chung H.-Y., Geim A. K., Novoselov K. S., Sohn B.-H., Shin H. S. // Nature Communications, 2019, 10.1038/s41467-018-08227-1.

86. Khademhosseini V., Dideban D., Ahmadi M. T., Ismail R., Heidari H. // Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, doi:10.1007/s10854-019-01121-6.

87. Khademhosseini V., Dideban D., Ahmadi M. T., Ismail R., Heidari H. // ECS Journal of Solid State Science and Technology **7** (10), M145 (2018).

88. Stampfer C., Schurtenberger E., Molitor F., Güttinger J., Ihn T., Ensslin K. // Nfno Lett. **8** (8), 2378 (2008).

89. Ihn T., Güttinger J., Molitor F., Schnez S., Schurtenberger E., Jacobsen A., Hellmüller S., Frey T., Dröscher S., Stampfer C., Ensslin K. // Materials Today **13** (3), 44 (2010).

90. Puczkarski P., Gehring P., Lau C. S., Liu J., Ardavan A., Warner J. H., Briggs G. A. D., Mol J. A. // Appl. Phys. Lett. **107**, 133105 (2015).

91. Gehring P., Sowa J. K., Cremers J., Wu Q., Sadeghi H., Sheng Y., Warner J. H., Lambert C. J., Briggs G. A. D., Mol J. A. // ACS Nano **11**, 5325 (2017).

92. Hosseini V. K., Dideban D., Ahmadiz M. T., Ismail R. // International Journal of Modern Physics B **32**, 1850235 (2018).

93. Sofo J. O., Chaudhari A. S., Barber G. D. // Phys. Rev. B **75**, 153401 (2007).

94. Lebègue S., Klintenberg M., Eriksson O., Katsnelson M. I. // Phys. Rev. B **79**, 245117 (2009).

95. Klintenberg M., Lebègue S., Katsnelson M. I., Eriksson O. // Phys. Rev. B **81**, 085433 (2010).

96. F., Otyepka M. // J. Chem. Theory Comput. **9**, 4155 (2013).

97. Sahin H., Leenaerts O., Singh S. K., Peeters F. M. GraphAne: From Synthesis to Applications // arXiv:1502.05804v1 [cond-mat.mtrl-sci], 2015.

98. Majidi R. // JMNS **4** (1-2), 11 (2015).

99. Son J., Lee S., Kim S. J., Park B. C., Lee H.-K., Kim S., Kim J. H., Hong B. H., Hong J. // Nature Communications, 2016, doi: 10.1038/ncomms13261.

100. Hou X., Xie Z., Li C., Li G., Chen Z. // Materials, 2018, doi: 10.3390/ma11020188.

101. Liu Y., Bo M., Sun C. Q., Huang Y. // Nanomaterials, 2018, doi: 10.3390/nano8020092.

102. Peng Q., Dearden A. K., Crean J., Liang Han L., Liu S., Wen X., De S. // Nanotechnology, Science and Applications, 2014, doi: 10.2147/NSA.S40324.

103. Lundie M., Sljivancanin Z., Tomi S. // Journal of Physics: Conference Series **526** (2014) 012003, doi: 10.1088/1742-6596/526/1/012003.

104. Einollahzadeh H., Fazeli S. M., Dariani R. S. // Science and Technology of Advanced Materials **17** (1), 610 (2016).

105. Vargas-Bernal R. // In *Two-Dimensional Materials – Synthesis, Characterization and Potential Applications*. *Chapter 6*. Ed. P. K. Nayak (Published inTech, Croatia, 2016).

106. Kondrin M. V., Brazhkin V. V. // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics **7** (1), 44 (2016).

107. Nechaev Y. S., Veziroglu N. // The Open Fuel Cells Journal **6**, 21 (2013).

108. Di L., Yu-Rong Y., Yang X., Xiao-Yu Z. // Chin. Phys. B **20** (11), 118101 (2011).

109. Solis D. A., Borges D. D., Woellner C. F., Galo D. S. // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b03481.

110. Fiori G., Lebègue S., Betti A., Michetti P., Klintenberg M., Eriksson O., Iannaccone G. // Phys. Rev. **B 82**, 153404 (2010).

111. Gharekhanlou B., Tousaki S. B., Khorasani S. // Journal of Physics: Conference Series **248**, 012061 (2010).

112. Huang Liang-feng, Zeng Z. // Front. Phys. **7** (3), 324 (2012), doi: 10.1007/s11467-011-0239-3.

113. Ho K.-I., Huang C.-H., Liao J.-H., Zhang W., Li L.-J., Chao-Sung Lai C.-S., Su C.-Y. // Scientific Reports, 2014, doi: 10.1038/srep05893.

114. Bao Z., Dodabalapur A., Lovinger A. J. // Appl. Phys. Lett. **69** (26), 4108 (1996).

115. Sirringhaus H., Tessler N., Friend R. H. // Science **280**, 1741 (1998).

116. Ridley B. A., Nivi B., Jacobson J. M. // Science **286**, 746 (1999).

117. Kagan C. R., Mitzi D. B., Dimitrakopoulos C. D. // Science **286**, 945 (1999).

118. Duan X., Niu C., Sahi V., Chen J., Parce J. W., Empedocles S., Goldman J. L. // Nature **425**, 274 (2003).

119. Podzorov V., Gershenson M. E., Kloc Ch., Zeis R., Bucher E. // Appl. Phys. Lett. **84** (17), 3301 (2004), doi: 10.1063/1.1723695.

120. Yoon Y., Ganapathi K., Salahuddin S. // Nano Lett. **11**, 3768 (2011).

121. Radisavljevic B., Radenovic A., Brivio J., Giacometti V., Kis A. // Nature Nanotechnology **6**, 147 (2011).

122. Das S., Chen H.-Y., Penumatcha A. V., Appenzeller J. // Nano Lett., 2012, doi: 10.1021/nl303583v.

123. Kim S., Konar A., Hwang W.-S., Lee J. H., Lee J., Yang J., Jung C., Kim H., Yoo J.-B., Choi J.-Y., Jin Y. W., Lee S. Y., Jena D., Choi W., Kim K. // Nature communications, 2012, doi: 10.1038/ncomms2018.

124. Liu H., Ye P. D. // IEEE Electron. Device Lett. **33** (4), 546 (2012).

125. Pu J., Yomogida Y., Liu K.-K., Li L.-J., Iwasa Y., Takenobu T. // Nano Lett. **12**, 4013 (2012).

126. Lee G.-H., Yu Y.-J., Cui X., Petrone N., Lee C.-H., Choi M. S., Lee D.-Y., Lee C., Yoo W. J., Watanabe K., Taniguchi T., Nuckolls C., Kim P., Hone J. // ACS Nano **7** (9), 7931 (2013).

127. Yoon J., Park W., Bae G.-Y., Kim Y., Jang H. S., Hyun Y., Lim S. K., Kahng Y. H., Hong W.-K., Lee B. H., Ko H. C. // Small, 2013, doi: 10.1002/smll.201300134.

128. Cheng R., Jiang S., Chen Y., Liu Y., Weiss N., Cheng H.-C., Wu H., Huang Y., Duan X. // Nature Communications, 2014, doi: 10.1038/ncomms6143.

129. Roy T., Tosun M., Kang J. S., Sachid A. B., Desa S. B., Hettick M., Hu C. C., Javey A. // ACS Nano, 2014, doi: 10.1021/nn501723y.

130. Cho A.-J., Park K. C., Kwon J.-Y. // Nanoscale Research Letters, 2015, doi: 10.1186/s11671-015-0827-1.

131. Han S. A., Bhatia R., Kim S.-W. // Nano Convergence, 2015, doi: 10.1186/s40580-015-0048-4.

132. Sanne A., Ghosh R., Rai A., Movva H. C. P., Sharma A., Rao R., Mathew L., Banerjee S. K. // Appl. Phys. Lett. **106**, 062101 (2015).

133. Tong X., Ashalley E., Lin F., Li H., Wang Z. M. // Nano-Micro Lett., 2015, doi: 10.1007/s40820-015-0034-8.

134. Friedman A. L., Hanbicki A. T., Perkins F. K., Jernigan G. G., Culbertson J. C., Campbell P. M. // Scientific Reports, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-04224-4.

135. Horri A., Faez R., Pourfath M., Darvish G. // IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, doi: 10.1109/TED.2017.2716938.

136. Robertson J., Liu X., Yue C., Escarra M., Wei J. // 2D Mater. 2017, doi: 10.1088/2053-1583/aa8678.

137. Sanne A., Park S., Ghosh R., Yogeesh M. N., Liu C., Mathew L., Rao R., Akinwande D., Banerjee S. K. // 2D Materials and Applications, 2017, doi: 10.1038/s41699-017-0029-z.

138. Xu H., Zhang H., Guo Z., Shan Y., Wu S., Wang J., Hu W., Liu H., Sun Z., Luo C., Wu X., Xu Z., Zhang D. W., Bao W., Zhou P. // Small, **14**, 1803465 (2018).

139. Pradhan N. R., Rhodes D., Xin Y., Memaran S., Bhaskaran L., Siddiq M., Hill S., Ajayan P. M., Balicas L. // ACS Nano, 2014, doi: 10.1021/nn501693d.

140. Das S. R., Kwon J., Prakash A., Delker C. J., Das S., Janes D. B. // Appl. Phys. Lett. **106**, 083507 (2015), doi: 10.1063/1.4913714.

141. Jeong Y., Park J. H., Ahn J., Lim J. Y., Kim E., Im S. // Adv. Mater. Interfaces, 1800812 (2018).

142. Lee H., Ahn J., Im S., Kim J., Choi W. // Scientific Reports, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-29942-1.

143. Fathipour S., Ma N., Hwang W. S., Protasenko V., Vishwanath S., Xing H. G., Xu H., Jena D., Appenzeller J., Seabaugh A. // Appl. Phys. Lett. **105**, 192101 (2014).

144. Pradhan N. R., Rhodes D., Feng S., Xin Y., Memaran S., Moon B.-H., Terrones H., Terrones M.,

Balicas L. // ACS Nano, 2014, doi: 10.1021/nn501013c.

145. Yin L., Zhan X., Xu K., Wang F., Wang Z., Huang Y., Wang Q., Jiang C., Heb J. // Appl. Phys. Lett. **108**, 043503 (2016), doi: 10.1063/1.4941001.

146. Sirota B., Glavin N., Krylyuk S., Davydov A. V., Voevodin A. A. // Scientific Reports, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-26751-4.

147. Liu X., Hu J., Yue C., Fera N. D., Ling Y., Mao Z., Wei J. // ACS Nano, 2014, doi: 10.1021/nn505253p.

148. Iqbal M. W., Iqbal M. Z., Khan M. F., Shehzad M. A., Seo Y., Eom J. // Nanoscale, 2014, doi: 10.1039/C4NR05129G.

149. Iqbal M. W., Iqbal M. Z., Khan M. F., Shehzad M. A., Seo Y., Park J. H., Hwang C., Eom J. // Scientific Reports, 2015, doi: 10.1038/srep10699.

150. Cui Y., Xin R., Yu Z., Pan Y., Ong Z.-Y., Wei X., Wang J., Nan H., Ni Z., Wu Y., Chen T., Shi Y., Wang B., Zhang G., Zhang Y.-W., Wang X. // Adv. Mater. **27**, 5230 (2015).

151. Fang H., Chuang S., Chang T. C., Takei K., Takahashi T., Javey A. // Nano Lett., 2012, doi: 10.1021/nl301702r.

152. Liu W., Kang J., Sarkar D., Khatami Y., Jena D., Banerjee K. // Nano Lett. **13**, 1983 (2013).

153. Liu B., Ma Y., Zhang A., Chen L., Abbas A. N., Liu Y., Shen C., Wan H., Zhou C. // ACS Nano, 2016, doi: 10.1021/acsnano.6b00527.

154. Pudasaini P. R., Oyedele A., Zhang C., Stanford M. G., Cross N., Wong A. T., Hoffman A. N., Xiao K., Duscher G., Mandrus D. G., Ward T. Z., Rack P. D. // Nano Res., 2017, doi: 10.1007/s12274-017-1681-5.

155. He J., Fang N., Nakamura K., Ueno K., Taniguchi T., Watanabe K., Nagashio K. // Adv. Electron. Mater., 1800207 (2018), doi: 10.1002/aelm.201800207.

156. Si M., Jiang C., Chung W., Du Y., Alam M. A., Ye P. D. // Nano Lett. **18**, 3682 (2018).

157. Liu F., Wang J., Guo H. // Nanotechnology **26**, 175201 (2015), doi: 10.1088/0957-4484/26/17/175201.

158. Zhang M., Wu J., Zhu Y., Dumcenco D. O., Hong J., Mao N., Deng S., Chen Y., Yang Y., Jin C., Chaki S. H., Huang Y.-S., Zhang J., Xie L. // ACS Nano, **8** (7), 7130 (2014), doi: 10.1-21/nn5020566.

159. Zhang M., Zhu Y., Wang X., Feng Q., Qiao S., Wen W., Chen Y., Cui M., Zhang J., Cai C., Xie L. // J. Am. Chem. Soc., 2015, doi: 10.1021/jacs.5b03807.

160. Zhu Y., Wang X., Zhang M., Cai C., Xie L. // Nano Res. **9**, 2931 (2016).

161. Yan C., Gong C., Wangyang P., Chu J., Hu K., Li C., Wang X., Du X., Zhai T., Li Y., Xiong J. // Adv. Funct. Mater., 1803305 (2018).

162. Mleczko M. J., Zhang C., Lee H. R., Kuo H.-H., Magyari-Köpe B., Moore R. G., Shen Z.-X., Fisher I. R., Nishi Y., Pop E. // Sci. Adv., 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700481.

163. Xu K., Wang Z., Wang F., Huang Y., Wang F., Yin L., Jiang C., He J. // Adv. Mater. **27**, 7881 (2015).

164. Kanazawa T., Amemiya T., Ishikawa A., Upadhyaya V., Tsuruta K., Tanaka T., Miyamoto Y. // Scientific Reports, 2016, doi: 10.1038/srep22277.

165. Fu L., Wang F., Wu B., Wu N., Huang W., Wang H., Jin C., Zhuang L., He J., Fu L., Liu Y. // Adv. Mater., **29**, 1700439 (2017).

166. Nie X.-R., Sun B.-Q., Zhu H., Zhang M., Zhao D.-H., Chen L., Sun Q.-Q., Zhang D. W. // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2017, doi: 10.1021/acsami.7b06160.

167. Kang M., Rathi S., Lee I., Lim D., J Wang J., Li L., Khan M. A., Kim G.-H. // Appl. Phys. Lett. **106**, 143108 (2015).

168. Kang M., Rathi S., Lee I., Li L., Khan M. A., Lim D., Lee Y., Park J., Yun S. J., Youn D.-H., Jun C., Kim G.-H. // Nanoscale, **9**, 1645 (2017).

169. Zhao D., Xie S., Wang Y., Zhu H., Chen L., Sun Q., Zhang D. W. // AIP Advances **9**, 025225 (2019), doi: 10.1063/1.5086447.

170. Zhao Y., Qiao J., Yu Z., Yu P., Xu K., Lau S. P., Zhou W., Liu Z., Wang X., Ji W., Chai Y. // Adv. Mater., **29**, 1604230 (2017).

171. Ciarrocchi A., Avsar A., Ovchinnikov D., Kis A. // Nature Communication, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-03436-0.

172. Huifang M., Chen P., Li B., Li J., Ai R., Zhang Z., Sun G., Yao K., Lin Z., Zhao B., Wu R., Tang X., Duan X., Duan X. // Nano Lett., 2018, doi: 10.1021/acs.nanolett.8b00583.

173. Ghorbani-Asl M., Kuc A., Miró P., Heine T. // Adv. Mater. **28**, 853 (2016).

174. Perucchini M., Marian D., Marin E. G., Iannaccone G., Fiori G. // Graphene, 2019

175. Chow W. L., Yu P., Liu F., Hong J., Wang X., Zeng Q., Hsu C.-H., Zhu C., Zhou J., Wang X., Xia J., Yan J., Chen Y., Wu D., Yu T., Shen Z., Lin H., Jin C., Tay B. K., Liu Z. // Adv. Mater., 1602969 (2017), doi: 10.1002/adma.201602969.

176. Corbet C. M., McClellan C., Rai A., Sonde S. S., Tutuc E., Banerjee S. K. // ACS Nano **9** (1), 363 (2015).

177. He X., Liu F., Hu P., Fu W., Wang X., Zeng Q., Zhao W., Liu Z. // Small, 2015, doi: 10.1002/smll.201501488.

178. Liu E., Fu Y., Wang Y., Feng Y., Liu H., Wan X., Zhou W., Wang B., Shao L., Ho C.-H., Huang Y.-S., Cao Z., Wang L., Li A., Zeng J., Song F., Wang X., Shi Y., Yuan H., Hwang H. Y., Cui Y., Miao F., Xing D. // Nature Communications, 2015, doi: 10.1038/ncomms7991.

179. Zhang E., Jin Y., Yuan X., Wang W., Zhang C., Tang L., Liu S., Zhou P., Weida Hu W., Xiu F. // Adv. Funct. Mater. **25**, 4076 (2015), doi: 10.1002/adfm.201500969.

180. Shim J., Oh A., Kang D.-H., Oh S., Jang S. K., Jeon J., Jeon M. H., Kim M., Choi C., Lee J., Lee S., Yeom G. Y., Song Y. J., Park J.-H. // Adv. Mater., 2016, doi: 10.1002/adma.201601002.

181. Mohammed O. B., Movva H. C. P., Prasad N., Valsaraj A., Kang S., Corbet C. M., Taniguchi T., Watanabe K., Register L. F., Tutuc E., Banerjee S. K. // Journ. Appl. Phys., **122**, 245701 (2017).

182. Park J. Y., Joe H.-E., Yoon H. S., Yoo S.-H., Kim T., Kang K., Min B.-K., Jun S. C. // ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, doi: 10.1021/acsami.7b06432.

183. Gao N., Zhou S., Liu N., Bai Y., Zhao J. // J. Mater. Chem. C, 2018, doi: 10.1039/C8TC02116C.

184. Liao W., Wei W., Tong Y., Chim W. K., Zhu C. // ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b00193.

185. Khosravi A., Addou R., Catalano M., Kim J., Wallace R. M. // Materials, 2019, doi: 10.3390/ma12071056.

186. Kang B., Y Kim Y., Cho J. H., Lee C. // 2D Materials, 025014 (2017).

187. Lee K.-C., Yang S.-H., Sung Y.-S., Chang Y.-M., Lin C.-Y., Yang F.-S., Li M., Watanabe K., Taniguchi T., Ho C.-H., Lien C.-H., Lin Y.-F. // Adv. Funct. Mater. 1809011 (2019).

188. Pradhan N. R., Garcia C., Isenberg B., Rhodes D., Feng S., Memaran S., Xin Y., McCreary A., Walker A. R. H., Raeliarijaona A., Terrones H., Terrones M., McGill S., Balicas L. // Scientific Reports, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-30969-7.

189. Zhang W., Huang Z., Zhang W., Li Y. // Nano Res. **7** (12), 1731 (2014).

190. Desai S. B., Madhvapathy S. R., Sachid A. B., Llinas J. P., Wang O., Ahn G. H., Pitner G., Kim M. J., Bokor J., Hu C., Wong H.-S. P., Javey A. // Science **354** (6308), 99 (2016).

191. Ovchinnikov D., Gargiulo F., Allain A., Pasquier D.J., Dumcenco D., Ho C.-H., Yazyev O. V., Kis A. // Nature Communications, 2016, doi: 10.1038/ncomms12391.

192. Lin Z., McCreary A., Briggs N., Subramanian S., Zhang K., Sun Y., Li X., Borys N. J., Yuan H., Fullerton-Shirey S. K., Chernikov A., Zhao H., McDonnell S., Lindenberg A. M., Xiao K., LeRoy B. J., Drndić M., Hwang J. C. M., Jiwoong Park J., Chhowalla M., Schaak R. E., Javey A., Hersam M. C., Robinson J., Terrones M. // 2D Mater. **3**, 042001 (2016), doi: 10.1088/2053-1583/3/4/042001.

193. Ye M., Zhang D., Yap Y. K. // Electronics **6** (43), 2017, doi: 10.3390/electronics6020043.

194. Xiong W.-W., Chen J.-O., Wu X.-C. Zhu J.-J. // J. Mater. Chem. C **2**, 7392 (2014).

195. Tao Y.-R., Wu J.-J., Wu X.-C. // Nanoscale, 2015, doi: 10.1039/C5NR03589A.

196. Island J. O., Buscema M., Barawi M., Clamagirand J. M., Ares J. R., Sánchez C., Ferrer I. J., Steele G. A., van der Zant H. S. J., Castellanos-Gomez A. // Adv. Optical Mater., 2014, doi: 10.1002/adom.201400043.

197. Lipatov A., Wilson P. M., Shekhirev M., Teeter J. D., Netusil R., Sinitskii A. // Nanoscale **7**, 12291 (2015).

198. Island J. O., Barawi M., Biele R., Almazán A., Clamagirand J. M., Ares J. R., Sánchez C., van der Zant H. S. J., Álvarez J. V., D'Agosta R., Ferrer I. J., Andres Castellanos-Gomez A. // Adv. Mater., 2015, doi: 10.1002/adma.201405632.

199. Molina-Mendoza A. J., Island J. O., Paz W. S., Clamagirand J. M., Ares J. R., Flores E., Leardini F., Sánchez C., Agraït N., Rubio-Bollinger G., van der Zant H. S. J., Ferrer I. J., Palacios J. J., Castellanos-Gomez A. // Adv. Funct. Mater. 2017, 1605647, doi: 10.1002/adfm.201605647.

200. Stolyarov M. A., Liu G., Bloodgood M. A., Aytan E., Jiang C., Samnakay R., Salguero T. T., Nika D. L., Rumyantsev S. L., Shur M. S., Bozhilov K. N., Balandin A. A. // Nanoscale, 2016, doi: 10.1039/c6nr03469a.

201. Liu G., Rumyantsev S., Bloodgood M. A., Salguero T. T., Shur M., Balandin A. A. // Nano Lett. **17**, 377 (2017), doi: 10.1021/acs.nanolett.6b04334.

202. Island J. O., Molina-Mendoza A. J., Barawi M., Biele R., Flores E., Clamagirand J. M., Ares J. R., Sánchez C., van der Zant H. S. J., D'Agosta R., Ferrer I. J., Castellanos-Gomez A. // 2D Materials, **4**, 022003 (2017), doi: 10.1088/2053-1583/aa6ca6.

203. Abdulsalam M., Joubert D. P. // Eur. Phys. J. B, 2015, doi: 10.1140/epjb/e2015-60005-x.

204. Abdulsalam M., Joubert D. P. // Phys. Status Solidi B **253** (5), 868 (2016), doi: 10.1002/pssb.201552705.

205. Li M., Dai J., Zeng X. // Nanoscale **37** (7), 15385 (2015), doi: 10.1039/c5nr04505c.

206. Dai J., Zeng X. C. // Angew. Chem. Int. Ed. **54**, 7572 (2015), doi: 10.1002/anie.201502107.

207. Qiao J., Kong X., Hu Z.-X., Yang F., Ji W. // Nature Communications, 2014, doi: 10.1038/ncomms5475.

208. Das S., Demarteau M., Roelofs A. // ACS Nano, 2014, doi: 10.1021/nn505868h.

209. Du Y., Liu H., Deng Y., Ye P. D. // ACS Nano **8** (10), 10035 (2014), doi: 10.1021/nn502553m.

210. Li L., Yu Y., Ye G. J., Ge Q., Ou X., Wu H., Feng D., Chen X. H., Zhang Y. // Nature Nanotechnology **9**, 2014, doi: 10.1038/nnano.2014.35.

211. Liu H., Neal A.T., Zhu Z., Luo Z., Xu X., Tomànek D., Ye P. D. // ACS Nano, 2014, doi: 10.1021/nn501226z.

212. Wang H., Wang X., Xia F., Wang L., Jiang H., Xia Q., Chin M. L., Dubey M., Han S.-J. // Nano Lett., 2014, doi: 10.1021/nl5029717.

213. Ang K.-W., Ling Z.-P., Zhu J. // 2015 IEEE Int. Conf. on Digital Signal Processing (DSP), doi: 10.1109/icdsp.2015.7252075.

214. Lee Y. T., Kwon H., Kim J. S., Kim H.-H., Lee Y. J., Lim J. A., Song Y.-W., Yi Y., Choi W.-K., Hwang D. K., Seongil Im S. // ACS Nano, 2015, doi: 10.1021/acsnano.5b04592.

215. Kim J.-S., Liu Y., Zhu W., Kim S., Wu D., Tao L., Dodabalapur A., Lai K., Akinwande D. // Scientific Reports, 2015, doi: 10.1038/srep08989.

216. Ling X., Wang H., Huang S., Xia F., Dresselhaus M. S. // PNAS Early Edition, 2015, doi: 10.1073/pnas.1416581112.

217. Xiong K., Luo X., Hwang J. C. M. // 2015 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Process for RF and THz Applications (IMWS-AMP), doi: 10.1109/IMWS-AMP.2015.7324944.

218. Zhu W., Yogeesh M. N., Yang S., Aldave S. H., Kim J., Sonde S. S., Tao L., Lu N., Akinwande D. // Nano Lett., 2015, doi: 10.1021/nl5047329.

219. Liu X., Ang K.-W., Yu W., He J., Feng X., Liu Q., Jiang H., Tang D., Wen J., Lu Y., Liu W., Cao P., Han S., Wu J., Liu W., Wang X., Zhu D., He Z. // Scientific Reports, 2016, doi: 10.1038/srep24920.

220. Haratipour N., Koester S. J. // IEEE Electron Device Lett. **37** (1), 103 (2016).

221. Yang L. M., Qiu G., Si M. W., Charnas A. R., Milligan C. A., Zemlyanov D. Y., Zhou H., Du Y. C., Lin Y. M., Tsai W., Paduano Q., Snure M., Ye P. D. // IEDM Tech. Dig., 2016, pp. 5.5.1–5.5.4, doi: 10.1109/IEDM.2016.7838354.

222. Illarionov Y. Y., Waltl M., Rzepa G., Knobloch T., Kim J.-S., Akinwande D., Grasser T. // npj 2D Materials and Applications, 2017, doi: 10.1038/s41699-017-0025-3.

223. Si M., Yang L., Du Y., Ye P. D. // Proc. Device Res. Cjnf. (DRC), 2017, pp. 1–2, doi: 10.1109/DRC.2017.7999395.

224. Li T., Zhang Z., Li X., Huang M., Li S., Li S., Wua Y. // Appl. Phys. Lett. **110**, 163507 (2017).

225. Ma Y., Shen C., Zhang A., Chen L., Liu Y.,

Chen J., Liu Q., Li Z., Amer M. R., Nilges T., Abbas A. N., Zhou C. // ACS Nano **11**, 7126 (2017), doi: 10.1021/acsnano.7b02858.

226. Xiong X., Li X., Huang M., Li T., Gao T., Wu Y. // IEEE Electron Device Lett. **39** (1), 127 (2018).

227. Dickerson W., Tayari V., Fakih I., Korinek A., Caporali M., Serrano-Ruiz M., Peruzzini M., Heun S., Botton G. A., Szkopek T. // Applied Phys. Lett. **112**, 173101 (2018).

228. He D., Wang Y., Huang Y., Shi Y., Wang X., Duan X. // Nano Lett., 2018, doi: 10.1021/acs.nanolett.8b03940.

229. Wu P., Ameen T., Zhang H., Bendersky L. A., Ilatikhameneh H., Klimeck G., Rahman R., Davydov A. V., Appenzeller J. // ACS Nano, 2018, doi: 10.1021/acsnano.8b06441.

230. Zheng S., Wu E., Zhang H. // IEEE Trans. on Nanotechnoligy **17** (3), 590 (2018).

231. Zheng Y., Hu Z., Han C., Guo R., Xiang D., Lei B., Wang Y., He J., Lai M., Chen W. // Nano Res., 2018, doi: 10.1007/s12274-018-2246-y.

232. Xia Y., Li G., Jiang B., Yang Z., Liu X., Xiao X., Flandre D., Wang C., Liu Y., Liao L. // Nanoscale, **11**, 10420 (2019), doi: 10.1039/c9nr02907a.

233. Xing B., Guan L., Yu Y., Niu X., Yan X., Zhang S., Yao J., Wang D., Sha J., Wang Y. // Nanotechnology, **30** (2019), doi: 10.1088/1361-6528/ab1ffe.

234. Zhang L., Shao L. Y., Gu G., Wang T., Sun X. W., Chen X. // Adv. Electron. Mater. **5**, 1900133, (2019), doi: 10.1002/aelm.201900133.

235. Wang Y., Huang P., Ye M., Quhe R., Pan Y., Zhang H., Zhong H. Shi J., Lu J. // Chem. Mater. **29**, 2191 (2017); doi: 10.1021/acs.chemmater.6b04909.

236. Ersan F., Kecik D., Ozcelik V. O., Kadioglu Y., Akturk U., Durgun E., Akturk E., Ciraci S. // Appl. Phys. Rev. **6**, 021308 (2019); doi: 10.1063/1.5074087.

237. Pizzi G., Gibertini M., Dib E., Marzari N., Iannaccone G., Fiori G. // Nature Communications, 2016, doi: 10.1038/ncomms12585.

238. Zhang S., Guo S., Chen Z., Wang Y., Gao H., Gormez-Herrero J., Ares P., Zamora F., Zhu Z., Zeng H. // Chem. Soc. Rev., 2017, doi: 10.1039/c7cs00125h.

239. Chang J. // Nanoscale, 2018, doi: 10.1039/C8NR03191F.

240. Chen J., Yang Z., Zhou W., Zou H., Li M., Ouyang F. // Phys. Status Solidi RRL, 2018, 1800038, doi: 10.1002/pssr.201800038.

241. Sun X., Song Z., Liu S., Wang Y., Li Y., Wang W., Lu J. // ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b03840.

242. Zhang H., Xiong J., Ye M., Li J., Zhang X., Quhe R., Song Z., Yang J., Zhang Q., Shi D., Yan J., Guo W., Robertson J., Wang Y., Pan F., Lu J. // Phys. Rev. Appl. **11**, 064001 (2019).

243. Zhou W., Chen J., Bai P., Guo S., Zhang S., Song X., Tao L., Zeng H. // Research, 2019, doi: 10.34133/2019/1046329.

244. Zhong M., Xia Q., Pan L., Liu Y., Chen Y., Deng H.-X., Li J., Wei Z. // Adv. Funct. Mater. 2018, 1802581, doi: 10.1002/adfm.201802581.

245. Yang Z., Wu Z., Lyu Y., Hao J. // InfoMat. **1** (1), 98 (2019), doi: 10.1002/inf2.12001.

246. Zhao J., Liu H., Yu Z., Quhe R., Zhou S., Wang Y., Liu C., Zhong H., Han N., Lu J., Yao Y., Wuf K. // Progress in Materials Science **83**, 24 (2016), doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.04.001.

247. Ni Z., Liu Q., Tang K., Zheng J., Zhou J., Qin R., Gao Z., Yu D., Lu J. // Nano Lett. **12**, 113 (2012), doi: 10.1021/nl203065e.

248. Vali M., Dideban D., Moezi N. // J. Comput. Electron., 2015, doi: 10.1007/s10825-015-0758-1.

249. Tao L., Cinquanta E., Chiappe D., Grazianetti C., Fanciulli M., Dubey M., Molle A., Akinwande D. // Nature Nanotechnology, **10** (2015), doi: 10.1038/nnano.2014.325.

250. Quhe R., Fei1 R., Liu Q., Zheng J., Li H., Xu C., Ni Z., Wang Y., Yu D., Gao Z., Lu J. // Scientific Reports, 2012, doi: 10.1038/srep00853.

251. Pan F., Wang Y., Jiang K., Ni Z., Ma J., Zheng J., Quhe R., Shi J., Yang J., Chen C., Lu J. // Scientific Reports, 2015, doi: 10.1038/srep09075.

252. Grazianetti C., Cinquanta E., Tao L., De Padova P., Quaresima C., Ottaviani C., Akinwande D., Molle A. // ACS Nano **11**, 3376 (2017), doi: 10.1021/acsnano.7b00762.

253. Satta M., Colonna S., Flammini R., Cricenti A., Ronci F. // PRL, **115**, 026102 (2015), doi: 10.1103/PhysRevLett.115.026102.

254. Quhe R.-G., Wang Y.-Y., Lü J. // Chin. Phys. B **24** (8), 088105 (2015).

255. Gablech I., Pekarek J., Klempa J., Svatos V., Sagedi-Moghaddam A., Neuzil P., Pumera M. // Trends in Analytical Chemistry, 2018, doi: 10.1016/j.trac.2018.05.008.

256. Ezawa M., Salomon E., De Padova P., Solonenko D., Vogt P., D'avila M. E., Molle A., Angot T., Le Lay G. // Rivista del Nuovo Cimento **41** (3), 175 (2018), doi: 10.1393/ncr/i2018-10145-y.

257. Molle A., Goldberger J., Houssa M., Xu Y., Zhang S.-C., Akinwande D. // Nature Materials, 2017, doi: 10.1038/NMAT4802.

258. Li H., Wang L., Liu Q., Zheng J., Mei W.-N., Gao Z., Shi J., Lu J. // Eur. Phys. J. B, 2012, doi: 10.1140/epjb/e2012-30220-2.

259. Kaneko S., Tsuchiya H., Kamakura Y., Mori N., Ogawa M. // Applied Physics Express **7**, 035102 (2014), doi: 10.7567/APEX.7.035102.

260. Marin E. G., Marian D., Iannaccone G., Fiori G. // Nanoscale **9**, 19390 (2017), doi: 10.1039/c7nr06015g.

261. Li X., Mullen J. T., Jin Z., Borysenko K. M., Nardelli M. B., Kim K. W. // Phys. Rev. B **87**, 115418 (2013), doi: 10.1103/PhysRevB.87.115418.

262. Dávila M. E., Xian L., Cahangirov S., Rubio A., Le Lay G. // New Journal of Physics **16**, 095002 (2014), doi: 10.1088/1367-2630/16/9/095002.

263. Garcia J. C., de Lima D. B., Assali L. V. C., Justo J. F. // J. Phys. Chem. C **115**, 13242 (2011).

264. Xu M., Liang T., Shi M., Chen H. // Chem. Rev. **113**, 3766 (2013).

265. Bianco E., Butler S., Jiang S., Restrepo O. D., Windl W., Goldberger J. E. // ACS Nano **7** (5), 4414 (2013), doi: 10.1021/nn4009406.

266. Zhao H., Zhang Chang-wen, Ji Wei-xiao, Zhang Run-wu, Li Sheng-shi, Yan Shi-shen, Zhang Bao-min, Li P., Wang Pei-ji. // Scientific Reports, 2016, doi: 10.1038/srep20152.

267. Khatami M. M., Gaddemane G., Van de Put M. L.,

Fischetti M. V., Moravvej-Farshi M. K., Mahdi Pourfath M., Vandenberghe W. G. // Materials **12**, 2935(2019), doi: 10.3390/ma12182935.

268. Zhao Y., AlMutairi A., Yoon Y. // IEEE Electron Dev. Lett. **38** (12), 2017, doi: 10.1109/LED.2017.2763120.

269. AlMutairi A., Zhao Y., Yin D., Yoon Y. // IEEE Electron., 2017, doi: 10.1109/LED.2017.2681579.

270. Brahma M., Bescond M., Logoteta D., Ghosh R. K., Mahapatra S. // IEEE Trans. on Electron. Devices **65** (3), 2018, doi: 10.1109/TED.2017.2788463.

271. Madhushankar B. N., Kaverzin A., Giousis T., Potsi G., Gournis D., Rudolf P., Blake G. R., van der Wal C. H., van Wees B. J. // 2D Mater. **4**, 021009 (2017), doi: 10.1088/2053-1583/aa57fd.

272. *Bismuth – Containing Alloys and Nanostructures*. Eds. Wang S., Lu P. 285 Springer Series in Materials Science, 2019 (Publ. Springer Nature Singapore Pte Ltd.).

273. Liu Y., Weiss N. O., Duan X., Cheng H.-C., Huang Y., Duan X. // Nature Reviews Materials, 1, 2016, doi: 10.1038/natrevmats.2016.42.

274. Iannaccone G., Bonaccorso F., Colombo L., Fiori G. // Nature Nanotechnology, 2018, doi: 10.1038/s41565-018-0082-6.

275. Dean C., Young A. F., Wang L., Meric I., Lee G.-H., Watanabe K., Taniguchi T., Shepard K., Kim P., Hone J. // Solid State Communications **152**, 1275 (2012), doi: 10.1016/j.ssc.2012.04.021.

276. Wofford J. M., Nakhaie S., Krause T., Liu X., Ramsteiner M., Hanke M., Riechert H., Lopes J. M. J. // Scientific Reports, 2017, doi: 10.1038/srep43644.

277. Qian Y., Ngoc V. H., Kang D. J. // Scientific Reports, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-17432-9.

278. Fiori G., Bruzzone S., Iannaccone G. // IEEE Trans. on Electron Dev. **60** (1), 268 (2013), doi: 10.1109/TED.2012.2226464.

279. Fiori G., Betti A., Bruzzone S., D'Amico P., Iannaccone G. // IEDM Tech. Dig. 11.4.1–11.4.4 (IEEE, 2011).

280. Fiori G., Betti A., Bruzzone S., Iannaccone G. // ACS Nano **6** (3), 2642 (2012), doi: 10.1021/nn300019b.

281. Moon J. S., Seo Hwa-chang, Stratan F., Antcliffe M., Schmitz A., Ross R. S., Kiselev A. A., Wheeler V. D., Nyakiti L. O., Gaskill D. K., Lee K.-M., Asbeck P. M. // IEEE Electron Device Letters **34**, 1190 (2013).

282. Mehr W., Dabrowski J., Scheytt J.C., Lippert G., Xie Y.-H., Lemme M. C., Ostling M., Lupina G. // IEEE Electron Device Letters **33**, 691 (2012).

283. Vaziri S., Lupina G., Henkel C., Smith A. D., Östling M., Dabrowski J., Lippert G., Mehr W., Lemme M. C. // Nano Lett. **13**, 1435 (2013), doi: 10.1021/nl304305x.

284. Yang H., Heo J., Park S., Song H. J., Seo D. H., Byun K.-E., Kim P., Yoo InKyeong, Chung H.-J., Kim K. // Science **336**, 1140 (2012), doi: 10.1126/science.1220527.

285. Horri A., Faez R., Pourfath M., Darvish G. // IEEE Trans. on Electron Devices, 2017, doi: 10.1109/TED.2017.2716938.

286. Georgiou T., Jalil R., Belle B. D., Britnell L., Gorbachev R. V., Morozov S. V., Kim Y.-J., Gholinia A., Haigh S. J., Makarovsky O., Eaves L., Ponomarenko L. A., Geim A. K., Novoselov K. S., Mishchenko A. // Nature Nanotechnology, 2012, doi: 10.1038/nnano.2012.224.

287. Cao J., Park J., Triozon F., Pala M. G., Cresti A. // ISTE OpenScience, 2018, doi: 10.21494/ISTE.OP.2018.0222.

288. Netsu S., Kanazawa T., Uwanno T., Amemiya T., Nagashio K., Miyamoto Y. // IEICE Trans. Electron., **E101–C**, 5, 338 (2018), doi: 10.1587/transele.E101.C.338.

289. Long M., Wang Y., Wang P., Zhou X., Xia H., Luo C., Huang S., Zhang G., Yan H., Fan Z., Wu X., Chen X., Lu W., Hu W. // ACS Nano, 2019, doi: 10.1021/acsnano.8b09476.

290. Fan Z.-Q., Jiang X.-W., Luo J.-W., Jiao L.-Y., Huang R., Li S.-S., Wang L.-W. // Phys. Rev., B **96**, 165402 (2017).

291. Marian D., Dib E., Cusati T., Marin E.G., Fortunelli A., Iannaccone G., Fiori G. // Phys. Rev. Appl. **8**, 054047 (2017).

292. Deng Y., Luo Z., Conrad N. J., Liu H., Gong Y., Najmaei S., Ajayan P. M., Lou J., Xu X., Ye P. D. // ACS Nano, **8** (8), 8292 (2014), doi: 10.1021/nn5027388.

293. Jiang X., Shi X., Zhang M., Wang Y., Gu Z., Chen L., Zhu H., Zhang K., Sun Q.-Q., Zhang D. W. // ACS Applied Nano Materials, 2019, doi: 10.1021/acsanm.9b01193.

294. Wang J., Jia R., Huang Q., Pan C., Zhu J., Wang H., Chen C., Zhang Y., Yang Y., Song H., Feng Miao F., Huang R. // Scientific Reports, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-35661-4.

295. Yan X., Liu C., Li C., Bao W., Ding S., Zhang D. W., Zhou P. // Small, 1701478 (2017), doi: 10.1002/smll.201701478.

296. Roy T., Tosun M., Cao X., Fang H., Lien D.-H., Zhao P., Chen Y.-Z., Chueh Y.-L., Guo J., Javey A. // ACS Nano, 2015, doi: 10.1021/nn507278b.

297. Yuan Y., Sun T., Hu Z., Yu W., Ma W., Zhang K., Sun B., Lau S. P., Bao Q., Lin S., Li S. // ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b13620.

298. Shang J., Zhang S., Wang Y., Wen H., Wei Z. // Chinese Optics Letters (COL) **17** (2), 020010 (2019), doi: 10.3788/COL201917.020010.

299. Na J., Kim Y., Smet J. H., Burghard M., Kern K. // ACS Applied Materials & Interfaces, **11**, 20973 (2019), doi: 10.1021/acsami.9b02589.

PACS: 81.07.-b, 81.10.-h

Photo- and nanoelectronics based on two-dimensional 2D-materials (a rewiev)

(Part II. 2D-nanotransistors)

V. P. Ponomarenko[1,2], *V. S. Popov*[1], *S. V. Popov*[3]

[1] Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

[2] Moscow Physical and Technical Institute (MIPT)
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

[3] Shvabe Holding
176 Prospekt Mira, Moscow, 129366, Russia

Received January 17, 2020

Structures and parameters of field-effect transistors (FETs) based on two-dimensional 2D-materials are reported, such as graphene (Gr) and graphene-like materials, graphene nanoribbons (GNR), transition metal di- and trichalcogenides MoS_2, $MoSe_2$, $MoTe_2$, WS_2, WSe_2, $Mo_{1-x}W_xSe_2$, ZrS_2, $ZrSe_2$, HfS_2, $HfSe_2$, PtS_2, $PtSe_2$, $PtTe_2$, $PdSe_2$, ReS_2, $ReSe_2$, HfS_3, ZrS_3, TiS_3, $TaSe_3$, NbS_3, phosphorene (bP), antimonene (2DSb), silicene (2DSi), germanene (2DGe), stanene (2DSn). Structures of FETs based on flexible substrates, tunneling FETs, single-electron FETs, field-effect transistors based on 2D-materials heterostructures such as Gr-(h)BN, Gr-WS_2, Gr-(h)BC_2N, Gr-FGr, SnS_2-WS_2, $SnSe_2$-WSe_2, HfS_2-MoS_2, $PdSe_2$-MoS_2, WSe_2-WO_{3-x} are also reported.

Keywords: 2D-nanostructure, heterostructure, nanotransistor, single-electron transistor, tunneling transistor, di- and trichalcogenides, graphene, phosphorene, silicene.