

Вертикальные гетероструктуры на основе графена и других монослойных материалов

© И.В. Антонова*+

* Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

+ Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 1 апреля 2015 г. Принята к печати 2 апреля 2015 г.)

Рассмотрены последние достижения в создании вертикальных гетероструктур на основе графена и монослоев других диэлектрических и полупроводниковых материалов, таких как гексагональный нитрид бора, дихалькогениды переходных металлов и др. Обсуждается значительный прогресс в данной области и огромные перспективы развития вертикальных гетероструктур для широкого спектра приложений, связанные прежде всего с пересмотром физических принципов построения и работы приборных структур с использованием графена в сочетании с другими монослойными материалами.

1. Введение

Гетероструктуры на основе графена и, особенно, вертикальные гетероструктуры рассматриваются в настоящее время как основное направление развития тонкопленочной (графеновой) электроники [1,2]. В последнее время для вертикальных гетероструктур на основе графена введено специальное название — ван-дер-ваальсовы гетероструктуры [3], так как предполагается их формирование последовательным перенесением слоев, когда слои в единой структуре будут удерживаться только за счет сил Ван-дер-Ваальса. Первые созданные гетероструктуры включали в себя слои гексагонального нитрида бора (hBN) и графена [4–7]. В последнее время начали появляться работы, посвященные гетероструктурам, использующим слои дихалькогенидов переходных металлов (NbSe₂, MoS₂, WS₂, WSe₂, TaS₂ и др.) [8–10]. В настоящее время создано и исследовано несколько типов таких гетероструктур, и они уже показали огромный потенциал развития данного направления. Важным достижением разрабатываемых гетероструктур является демонстрация возможностей новых физических подходов и новых принципов построения приборных структур, отличных от традиционных подходов в кремниевой электронике, когда ограничение в использовании графена для создания транзисторов из-за отсутствия запрещенной зоны легко снимается благодаря конструктивным решениям.

Кроме того, в статье обсуждается другой подход к созданию гетероструктур, основанный на использовании мультиграфена толщиной несколько нанометров (до 10 слоев), интеркаляции и химической функционализации для модификации свойств графена [11–14]. Такой подход позволяет создавать из нескольких монослоев графена (мультиграфена) определенные функциональные блоки для их использования в более сложных гетероструктурах.

В статье рассмотрены основные экспериментальные работы по созданию вертикальных гетероструктур на основе графена и других монослойных материалов.

2. Гетероструктуры с использованием графена и гексагонального нитрида бора

Гексагональный нитрид бора (гексагональная форма является графитоподобной) рассматривается в настоящее время как основной комплементарный материал для графена, который, в частности, при использовании его в качестве подложки обеспечивает высокую подвижность носителей в графене. Дефектность и туннельные токи через слои hBN разной толщины были исследованы в работе [6]. На рис. 1 приведены схема измерений, использованная в работе [6], данные атомно-силовой микроскопии (АСМ) и зависимость туннельного тока через 1–4 слоя hBN. Рисунок демонстрирует атомную гладкость поверхности hBN, отсутствие дефектов, высокую однородность туннельных токов через hBN и экспоненциальное уменьшение тока с ростом количества монослоев. Гладкость и однородность поверхности, а также низкий ($\sim 3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$) и однородно распределенный на нанометровом уровне заряд в hBN (по сравнению с SiO₂) был продемонстрирован на основании АСМ измерений и сканирующей туннельной спектроскопии в работе [15]. Шероховатость hBN или графена на hBN в 3 раза меньше, чем шероховатость SiO₂ [16]. Барьер для туннелирования носителей через hBN (3.07 эВ) и диэлектрическая прочность слоя (7.94 МВ/см) были определены в работе [17]. Для сравнения, высота барьера для туннелирования носителей через SiO₂ составляет 3.25 эВ [18], а диэлектрическая прочность — 8–10 МВ/см [19]. Ширина запрещенной зоны hBN составляет 5.2–6.0 эВ [19,20], расхождение в параметрах решетки hBN и графена составляет всего 1.7% (постоянная решетки hBN — 2.50 Å, а для графена — 2.46 Å) [21], толщина монослоя hBN оценивается как 0.33 нм [6,15]. Нужно также отметить стабильность свойств данного материала.

Размещение графена на подложках hBN приводит к существенному увеличению подвижности носите-

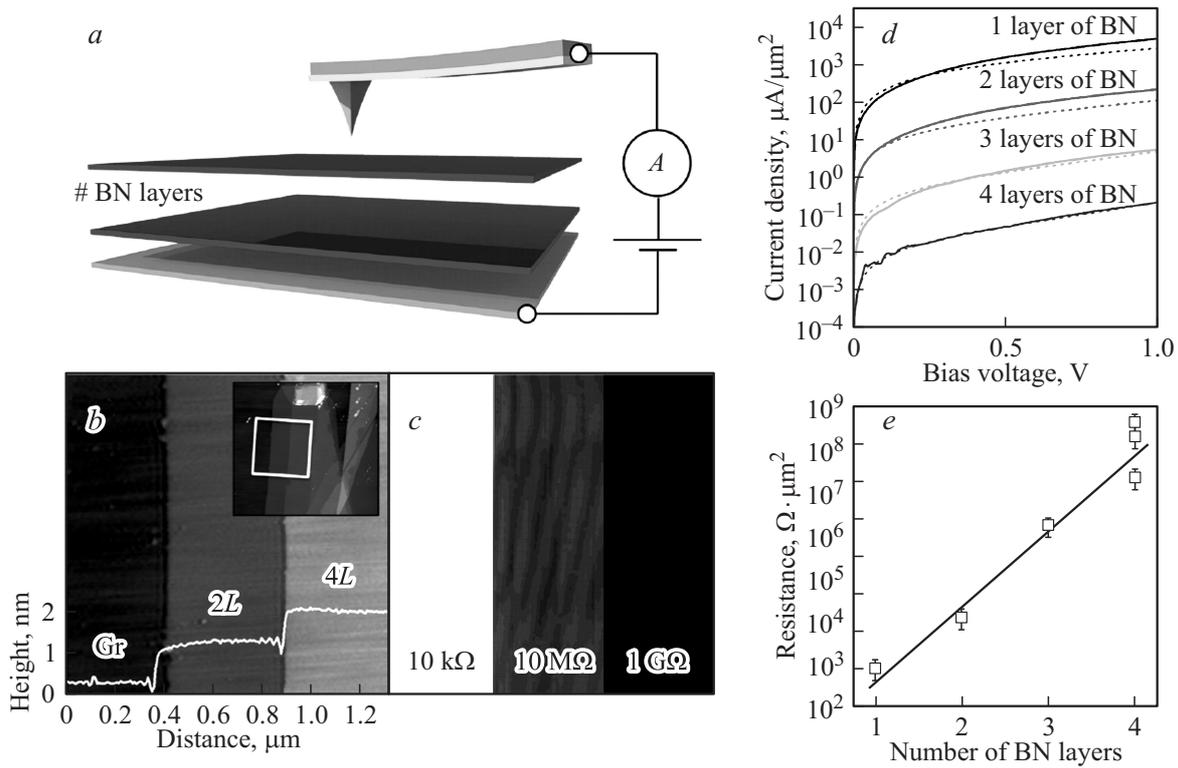


Рис. 1. *a* — схема исследования свойств hBN с помощью АСМ. Слои hBN были получены механическим отслоением от объемного кристалла. *b* — морфология поверхности гетероструктур графит/hBN толщиной 2 и 4 монослоя. На вставках приведены более крупное изображение структуры и профиль поверхности, демонстрирующий толщину слоев. *c* — карта тока утечки для той же структуры. *d* — вольт-амперные характеристики для структур графит/hBN/графит с разной толщиной hBN [6].

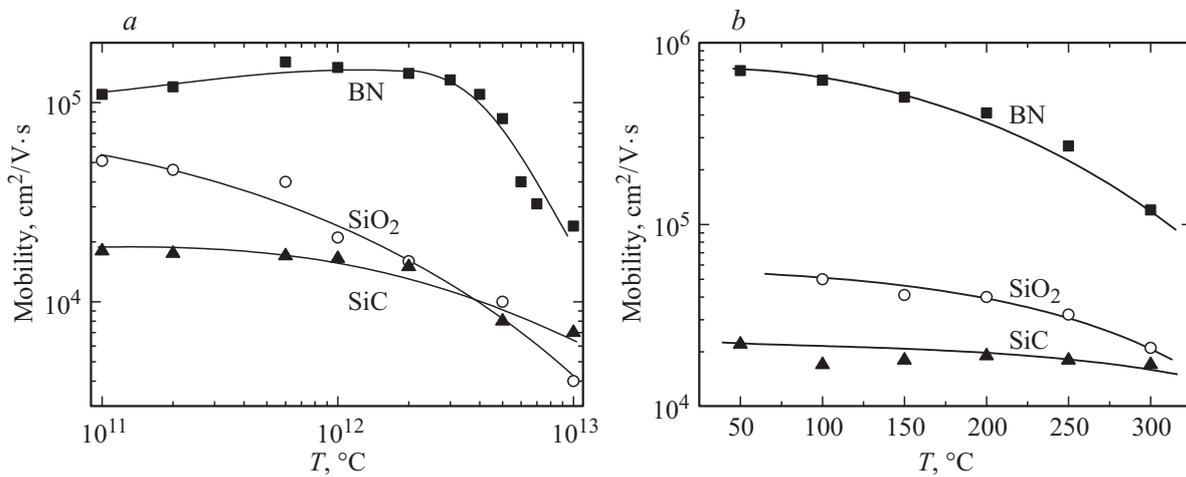


Рис. 2. Расчетные зависимости подвижности носителей в графене, расположенном на трех типах подложки от концентрации носителей (*a*) и температуры (*b*). Расчеты проводились методом Монте-Карло с учетом рассеяния на фононах и взаимодействия с подложкой [21].

лей в графене. Величина эффекта зависит от качества графена и hBN. Расчетные зависимости подвижности от температуры, концентрации носителей и типа подложек из работы [22] представлены на рис. 2. Экспериментально полученные значения подвижности носителей для комнатной температуры в

случае, когда используются слои, полученные механическим отслоением, как правило, лежат в интервале 35 000–100 000 см²/В·с [5,23,24], Для CVD выращенного графена с крупными монокристаллическими доменами (100–300 мкм) подвижность носителей внутри домена составляет 20 000–45 000 см²/В·с [16,25,26].

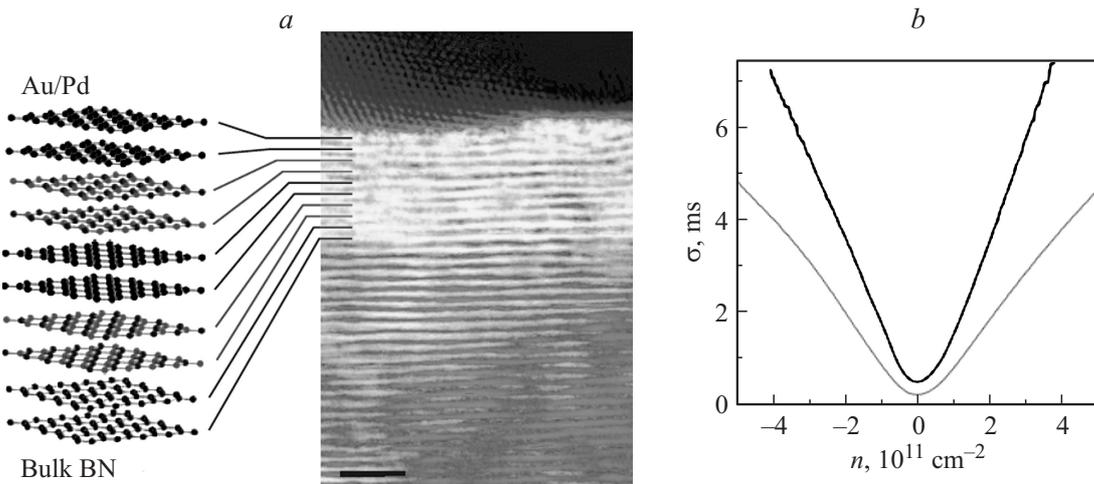


Рис. 3. *a* — сечение многослойной гетероструктуры, включающей в себя слои графена и hBN (толщина всей структуры — 40 нм, толщина слоя hBN — 4–5 нм), и *b* — проводимость нижнего слоя графена (черная кривая) и верхнего слоя графена (красная кривая) в этой структуре [7].

В случае поликристаллической пленки графена, выращенного методом CVD, подвижность носителей существенно ниже, и обычно не превышает нескольких тысяч [27,28]. Нужно отметить, также, работы по CVD росту графена на CVD выращенном hBN [29], которые в будущем, можно надеяться, позволят выращивать уже необходимые гетероструктуры.

Первая многослойная гетероструктура, состоящая из чередующихся слоев графена (или биграфена) и hBN, была создана и изучена в работе [7]. Общая толщина структуры достигала 40 нм, а толщина слоя hBN варьировалась в пределах 4–5 нм (рис. 3). Контакты к нижнему и верхнему слоям графена позволили измерить их проводимость и определить подвижность носителей. Подвижность носителей в верхнем слое составила $60\,000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, а в нижнем — $120\,000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (измерения проводились при $T = 4.2\text{ К}$). Таким образом, если графен с двух сторон окружен слоями hBN его подвижность существенно (\sim в 2 раза) выше, чем в случае, когда графен просто лежит на слое hBN. На основе многослойных гетероструктур hBN/графен был предложен новый подход к созданию транзисторов на графене [5]. В транзисторных структурах с каналом из графена в традиционной конфигурации прибора отсутствие запрещенной зоны в графене, высокая проводимость вблизи точки нейтральности и эффект Клейна приводили к высоким значениям тока в закрытом состоянии и не позволяли получать значительную модуляцию тока (отношение токов в открытом и закрытом состоянии транзистора $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$, как правило, менее 10). Предлагаемая в [5] конструкция транзистора включает в себя два слоя графена, разделенных туннельно прозрачным слоем нитрида бора (или MoS_2 , рис. 4). Авторы показали, что протекание тока обеспечивается туннелированием дырок через слой hBN с эффективной

массой $\sim 0.5m_0$ (m_0 — масса свободного электрона), что соответствует эффективной массе дырок в hBN. При исследовании тока, протекающего поперек структуры, было также показано, что модуляция тока напряжением на кремниевой подложке (затворе) значительно сильнее, чем в планарной транзисторной структуре. Время туннелирования носителей через слой hBN составляло фемтосекунды, что значительно меньше времен прохода электронов в кремниевых полевых транзисторах. Авторы варьировали толщину слоя hBN и нашли, что оптимальная толщина составляет 4–7 монослоев. Было показано, что при такой толщине отношение токов $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ может достигать $\sim 10^4$. Однако структуры с толщиной hBN 4–7 монослоев требуют высокого напряжения на затворе (до 50 В). Структуры, содержащие 2–4 монослоя hBN, позволяют снизить напряжение на затворе, но при этом уменьшается и отношение $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$.

В работе [30] исследовалось туннелирование носителей через слой hBN, расположенный между двумя слоями графена в более широком интервале напряжений, и показана возможность создания туннельных диодных структур с нелинейными вольт-амперными характеристиками (ВАХ). На рис. 5, *a* представлена схема созданной структуры и схема приложения напряжений к ней. Слой hBN, на котором расположена структура, не полностью экранирует графеновые электроды от подложки, и поэтому, подавая напряжение на кремниевую подложку можно управлять потенциалом графеновых электродов. На рис. 5, *b* и 5 *c* приведены вольт-амперные характеристики в зависимости от напряжения между графеновыми электродами, измеренные при температуре 6–300 К и разных напряжениях на кремниевой подложке. Самое важное на этих характеристиках — нелинейность вольт-амперных характеристик (области отрицательного дифференциального сопротивления), по-

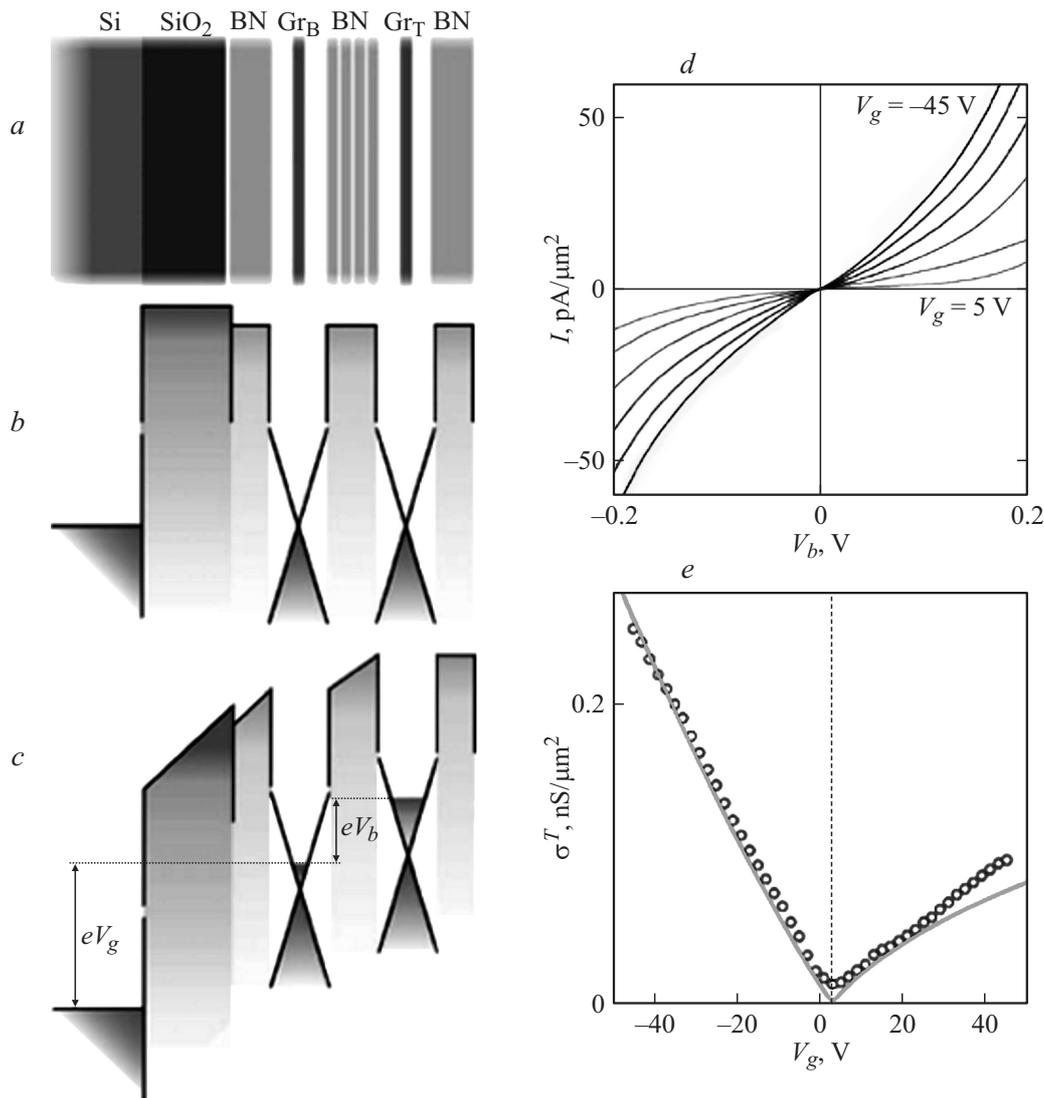


Рис. 4. *a* — схема поперечного сечения полевого транзистора; *b* — зонная диаграмма такого транзистора без приложенного напряжения и *c* — с приложенным напряжением. *d* — характеристики прибора с 6 монослоями hBN: ток сток-исток при разных напряжениях на затворе и *e* — передаточные характеристики, измеренные при нулевом напряжении на стоке (точки — эксперимент, кривая — результат моделирования). Температура измерений 240 К [5].

ложение которых зависит от напряжения на подложке. Максимумы на ВАХ наблюдаются в зависимости от напряжения на подложке либо при положительных, либо при отрицательных напряжениях между графеновыми электродами при условиях, когда положение точек Дирака в графеновых электродах выравниваются по своему потенциалу (условие резонанса, см. вставку на рис. 5, *b*). В зависимости от сочетания напряжений V_b и V_g , условия резонанса реализуются дважды при положительном, или отрицательном и нулевом V_b (см. результаты моделирования на рис. 5, *c* режим (i) и (ii)), и только в случае большой концентрации электронов на одном из графеновых электродов (см. вставку на рис. 5, *b* и режим (ii)) наблюдается максимум тока. Нелинейные характеристики при комнатной температуре делают эти

структуры интересными для практических применений. Нужно также отметить, что отсутствие пиков тока в аналогичных структурах, использованных в работе [5], связано с использованием более низких напряжений. Теоретически нелинейные вольт-амперные характеристики туннельных диодных структур были предсказаны в работах Feenstra [31,32], где учитывалась еще структура графена (размер монокристаллических зерен и их планарная разориентация). В этих работах было показано, что положение максимумов тока слабо зависит от температуры, что действительно наблюдалось в эксперименте.

В целом хорошее сочетание графена и hBN с точки зрения обеспечения высокой подвижности носителей в графене, интересные свойства вертикальных гетероструктур на основе графена и гексагонального нитрида

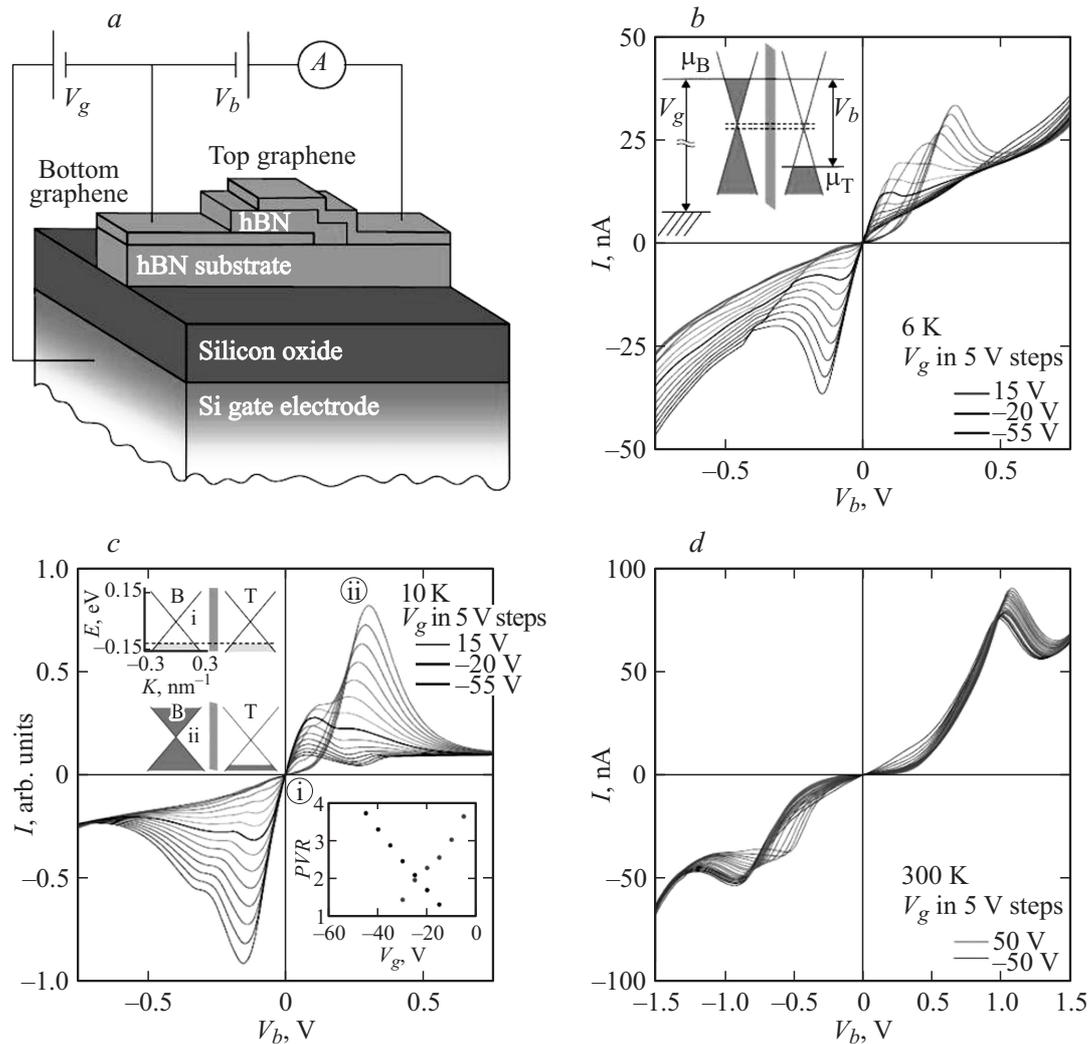


Рис. 5. *a* — схема исследуемой приборной структуры, *b* — вольт-амперные характеристики туннельного тока через слой hBN толщиной 4 монослоя, измеренные при температуре 6 К, и *d* — толщиной 5 монослоев, измеренные при температуре 300 К. Вставка на рисунке *b* представляет схему возникновения резонансного тока, когда при определенном напряжении на затворе (кремниевой подложке) положение точек Дирака в графеновых электродах выравнивается по своему потенциалу. На рис. *c* представлены результаты моделирования токов в данной структуре, а на вставках — зонные диаграммы для нулевого напряжения и максимума тока, а также зависимости максимума тока от напряжения на кремниевой подложке [30].

бора вызвали высокий интерес к этой системе. В результате, с учетом прогресса в CVD росте графена и слоев hBN, и росте латеральных гетероструктур [33,34] с резкими границами, можно надеяться на значительные успехи в создании и использовании гетероструктур графен-hBN уже в ближайшие годы.

Исследования при низких температурах показали, что слабое ван-дер-ваальсовое взаимодействие между слоями в гетероструктурах из графена и гексагонального нитрида бора приводит к неэквивалентности двух подрешеток графена, в результате чего закон дисперсии электронов изменяется с линейного на квадратичный (электроны приобретают массу), а в энергетическом спектре появляется энергетическая щель ~ 30 мэВ [35]. Возможность локального изменения эффективной массы

носителей, как считают авторы, открывает путь к созданию в графене квантовых точек, квантовых нитей.

3. Гибридные гетероструктуры, созданные с использованием интеркаляции

Рассмотрим альтернативный вариант высокоомных гибридных подложек, обеспечивающих высокую подвижность носителей в графене. Известно, что максимальная подвижность до $100\,000\text{--}200\,000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ наблюдается в подвешенном графене [36,37]. Самая удобная с технологической точки зрения подложка SiO₂ губит подвижность носителей в графене из-за рассеяния носителей на относительно большом и неравномерно распределенном

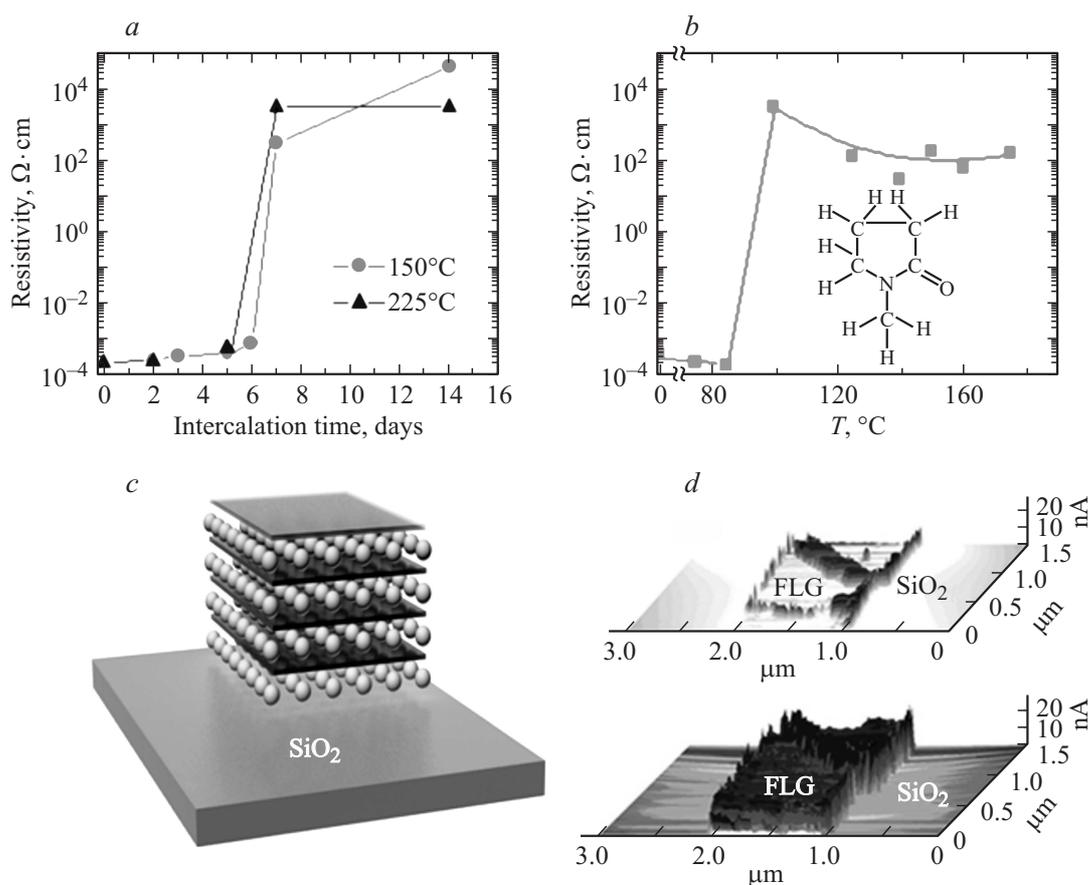


Рис. 6. *a* — сопротивление интеркалированного слоя мультиграфена шириной 5 мкм в зависимости от времени интеркаляции для разных температур отжига. *b* — зависимость сопротивления слоя от температуры отжига, время отжига 5 мин. На вставке приведено схематичное изображение молекулы N-метилпирролидона. *c* — схематичное изображение графена с высокой подвижностью носителей на гибридной высокоомной подложке. *d* — токовые карты, измеренные с использованием зонда атомно-силового микроскопа, до (верхнее) и после (нижнее) обработки в парах HF. Напряжение на зонде для измерения токовых карт составляло 50 мВ, ограничение по току — 25 нА.

заряде в SiO_2 [38,39], на поверхностных фононах [40,41] и неровностях поверхности [42,43]. Так, типичные значения подвижности носителей в поликристаллическом графене на SiO_2 составляют $2000\text{--}6000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ [44,45], а рекордные для монокристаллов графена — $10\,000$ и $16\,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ [46,47]. Как показано выше, наиболее подходящей подложкой для графена в настоящее время считается гексагональный нитрид бора.

Нами был предложен другой вариант подложек для графена, обеспечивающий высокую подвижность носителей. Такими подложками являются высокоомные слои, полученные интеркаляцией молекул N-метилпирролидона (NMP) с последующим отжигом в интервале температур $100\text{--}180^\circ\text{C}$ [11,48]. На рис. 6 приведены схематичное изображение такой подложки и результаты исследования ее свойств. В качестве исходного материала для реализации нашего подхода используется мультиграфен толщиной несколько нанометров. На рис. 6, *a* показано, что необходимо сформировать монослой из молекул NMP для того, чтобы при последующем отжиге сопротивление мультиграфена резко увеличилось.

Заметим, что с технологической точки зрения удобнее сначала литографически сформировать требуемые элементы, обеспечив тем самым определенную ширину мультиграфена, из которого будет формироваться структура, а затем проводить интеркаляцию и отжиг. Сопротивление слоев, отожженных при температуре $100\text{--}180^\circ\text{C}$, на 6–7 порядков выше, чем сопротивление графена. Рост сопротивления связан с взаимодействием NMP со слоями мультиграфена. В результате получается стабильная, атомарно-гладкая высокоомная подложка. Далее для получения слоя графена на гибридной подложке достаточно просто очистить верхний слой и восстановить его проводимость [14]. Для удаления NMP использовались пары либо водный раствор плавиковой кислоты HF.

В случае использования в качестве исходного материала графена, после очистки поверхности монослоя его проводимость полностью восстанавливалась (сопротивление уменьшалось на 7 порядков с $3.5 \cdot 10^8$ до $32 \text{ Ом}/\square$). Измерения, проведенные на данных структурах по двух- и четырехконтактной схеме, показыва-

ли различие в сопротивлении менее 10%. Подвижность, определенная из передаточных характеристик, возросла с 650 до 11 000 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для дырок и с 50 до 40 000 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для электронов. Для слоев толщиной 2–4 нм после обработки в парах или водном растворе HF сопротивление структуры уменьшалось на 2–4 порядка, что свидетельствует о не полной (односторонней) очистке верхнего слоя. Наилучшие результаты (с точки зрения максимальной подвижности) наблюдались для структур, отожженных при температурах 140–160 °C, когда подвижность электронов достигали значений 17 000–41 000 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [14]. Для дырок величины подвижностей были несколько ниже. Нужно отметить, что после восстановления проводимости в верхнем слое наблюдалась модуляция тока на 4 порядка напряжением на затворе (в качестве затвора использовалась кремниевая подложка), что связано с остаточной химической модификацией графена. Прямое доказательство, что проводимость поверхности возрастает после обработки в HF, представлено на рис. 6, с, где представлены токовые карты, полученные с использованием зонда атомно-силового микроскопа. Использование комбинационного рассеяния света и сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии показали, что восстановленные слои практически не содержат дефектов и имеют обычную морфологию поверхности после полного цикла проводимых химических и температурных обработок, что делает их перспективными для дальнейшего использования. Физические причины высокой модуляции тока в восстановленном слое графена связаны, скорее всего, с неполной очисткой слоя (с наличием туннельно-прозрачных барьеров для носителей), либо можно предположить, что эта модуляция связана с туннелированием носителей между слоями гибридной подложки при приложении напряжения на кремниевый затвор.

Обнаруженный эффект значительного увеличения подвижности носителей в верхнем слое графена на гибридной подложке после восстановления его проводимости связан с низким зарядом в гибридной подложке и экранировкой этим слоем зарядов в подложке SiO_2/Si . Интересно сравнить полученные нами значения подвижностей со значениями полученными для подложек hBN: полученные нами значения 17 000–41 000 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ близки к значениям подвижности, полученным при комнатной температуре в случае использования в качестве подложки hBN. Нужно также отметить, что использованный нами подход позволяет формировать сразу функциональный блок (подложка, обеспечивающая высокую подвижность, со слоем графена на поверхности), что удобно с точки зрения создания более сложных вертикальных гетероструктур.

Другим вариантом гибридных гетероструктур, созданных путем интеркаляции NMP в мультиграфен, является сверхрешетка гидрированного графена и монослоев NMP [11,49]. Для создания гидрированных слоев после интеркаляции использовался отжиг при более высоких температурах 200–250 °C. При таких термообработках

происходило формирование олигомеров NMP и дегидрирование этих молекул. В результате в межслоевом пространстве мультиграфена появлялись свободные атомы водорода, которые, взаимодействуя с близлежащими слоями графена, приводили к его гидрированию. Максимальная степень гидрирования наблюдалась при температурах отжига 225–250 °C. Было обнаружено, что в таких структурах наблюдаются запрещенная зона (до 2.7 эВ) и относительно высокая подвижность (до 10 000 $\text{см}^2/\text{В}$). Однако долговременная стабильность таких структур, как и у обычного гидрированного графена [50], ограничена.

4. Гетероструктуры с использованием дихалькогенидов переходных металлов

Дихалькогениды переходных металлов (NbSe_2 , MoS_2 , WS_2 , WSe_2 , TaS_2 и др.) относятся к слоистым соединениям, которые, как графит, можно разделять на отдельные монослои. Дихалькогениды переходных металлов имеют одинаковое строение: монослой включает в себя три слоя, средний из атомов переходного металла и два крайних из атомов серы или селена [51]. Толщина монослоя оценивается как 0.65 нм. Свойства зависят от состава, толщины и меняются от металлических до полупроводниковых. В частности, показано, что при переходе к монослою происходит переход от не прямой к прямой структуре энергетических зон с некоторым увеличением запрещенной зоны [52], что проявляется в значительном усилении фотолюминесценции монослоев, обнаруженном для MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 [53,54]. Расчетные значения запрещенных зон для ряда таких соединений, их взаимное расположение, а также их сочетание с графеном по данным работы [55] показаны на рис. 7.

Первыми стали исследовать слои MoS_2 , и транзисторы, сделанные из монослоев этого материала. В транзисторных структурах были получены значения подвижности не более 200–350 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, тогда как отношения токов $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ достигали 10^7 – 10^{10} [56,57]. В случае размещения слоя MoS_2 на подложке SiO_2/Si наблюдался сильный гистерезис на вольт-амперных характеристиках таких структур [58,59]. Попытки увеличить подвижность носителей в слоях MoS_2 показали, что использование ПММА в качестве подложки для MoS_2 увеличивает подвижность носителей до 480 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [59]. Такое значение подвижности характерно для относительно толстых слоев MoS_2 (~ 50 нм). Использование в качестве подложек ПММА позволяет избавиться и от гистерезиса на вольт-амперных характеристиках. Таким образом, транзисторы на гибких подложках ПММА являются в настоящее время лучшим вариантом реализации транзистора на слоях MoS_2 [59]. Другими приборными структурами, успешно реализованными на монослоях MoS_2 , являются элементы логики [60], фототранзистор [61] и чувствительный фотодетектор [62].

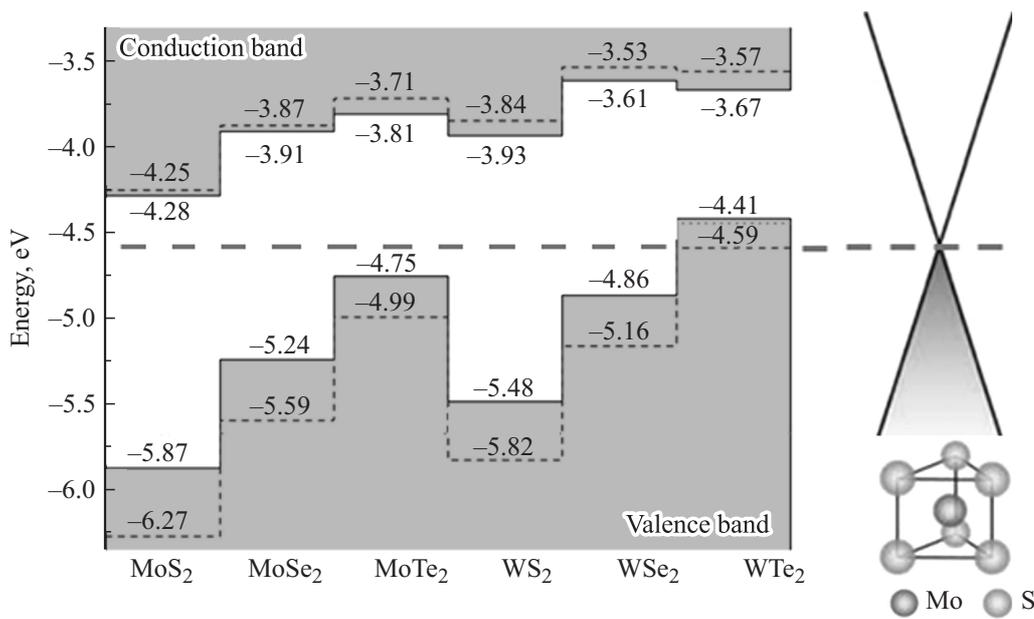


Рис. 7. Расчетная зонная структура монослоев различных дихалькогенидов переходных металлов и графена. Синие и черные цифры и границы зон соответствуют разным методам расчета [55]. Энергии отсчитываются от уровня электрона в вакууме. На вставку для примера приведена структура монослоя MoS₂. Толщина монослоя MoS₂ составляет ~ 0.65 нм.

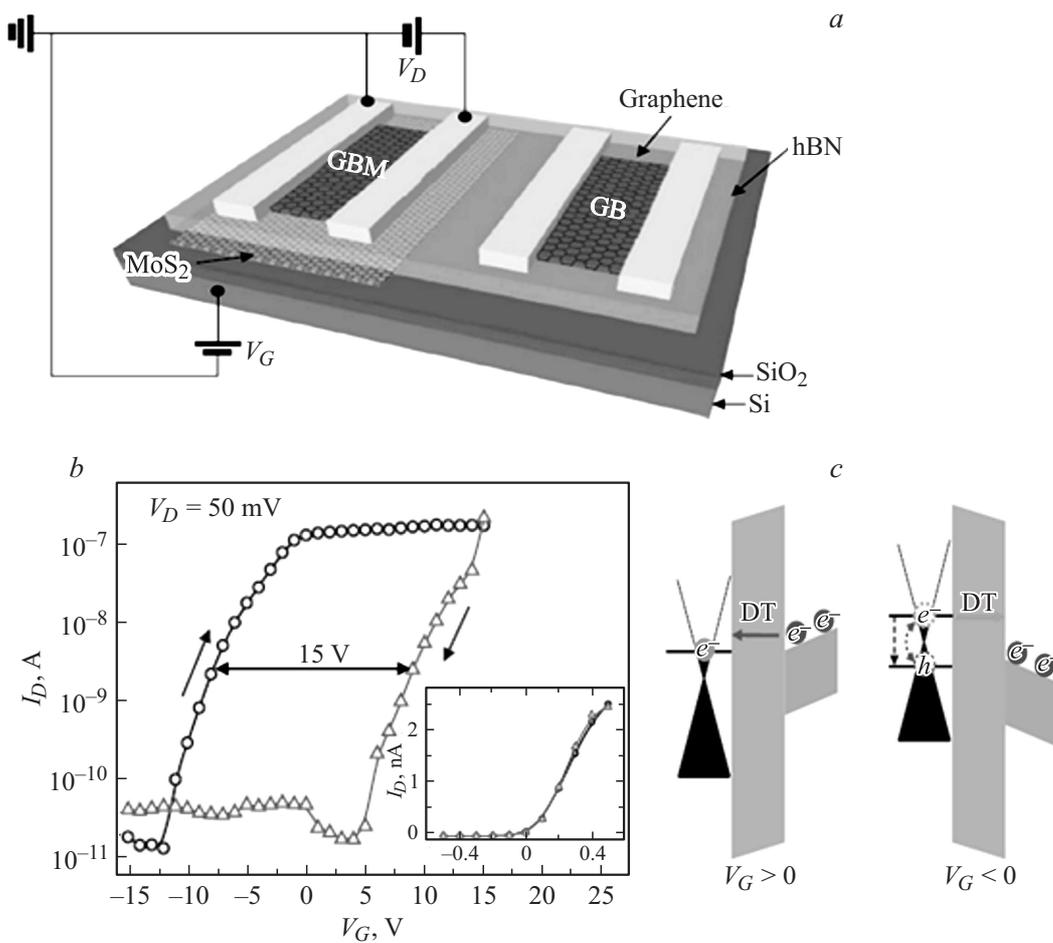


Рис. 8. *a* — схема гетероструктуры, состоящей из слоев MoS₂/hBN/графена и тестовой структуры hBN/графена. *b* — ток в графене в зависимости от напряжения на затворе (кремниевая подложка) для основной и контрольной (вставка) структур, измеренный для двух направлений развертки напряжения. Толщины слоев: hBN — 12 нм, MoS₂ — 3 слоя. *c* — зонные диаграммы структуры для режимов записи ($V_g > 0$) и стирания ($V_g < 0$) [63].

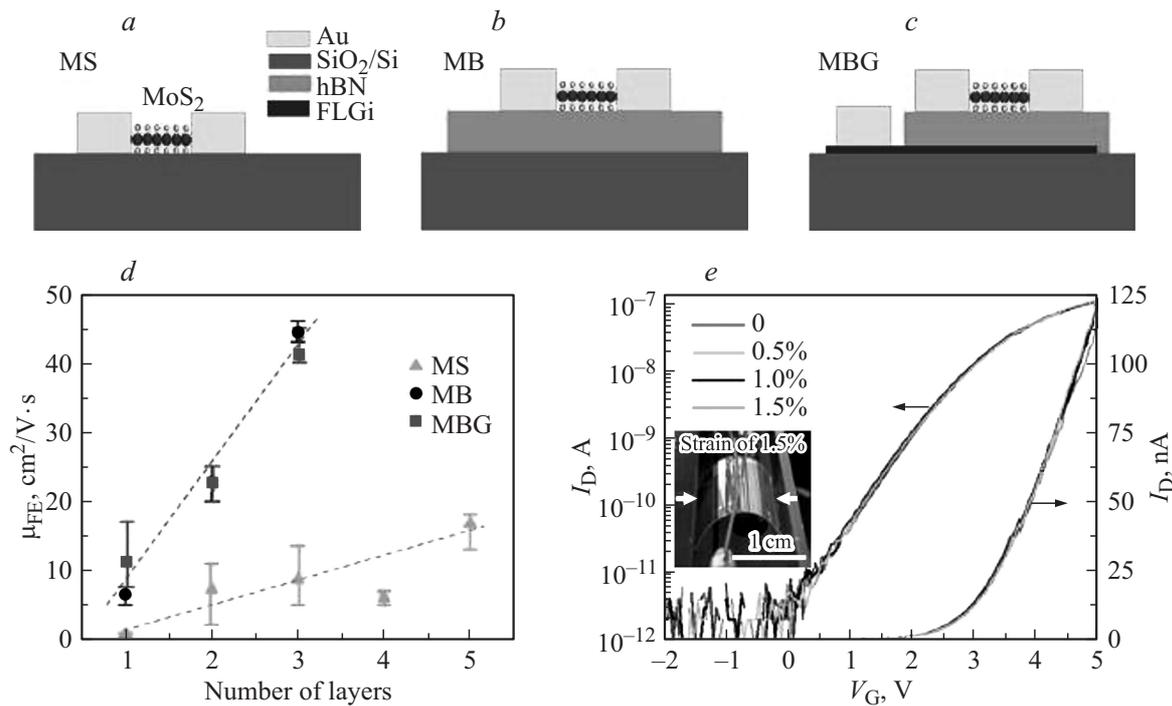


Рис. 9. *a–c* — схемы исследованных полевых транзисторов MS, MB и MBG, расположенных на гибкой подложке. *d* — зависимости подвижности в канале транзистора на подложке SiO₂/Si от количества монослоев MoS₂. *e* — вольт-амперные характеристики транзистора на гибкой подложке, измеренные при изгибе подложки до величины, соответствующей растяжению 1.5%. На вставке приведено изображение приборной структуры, изогнутой до напряжений 1.5% [65].

В сочетании с графеном монослой MoS₂ был использован для создания гетероструктур, обладающих эффектом памяти [63]. На рис. 8, *a* представлена схема структуры, состоящей из слоев MoS₂/hBN/графена. Вторая тестовая структура, сделанная для сравнения, не содержала слой MoS₂. Как известно, работа выхода MoS₂ составляет 4.6–4.9 эВ, ширина запрещенной зоны MoS₂ — 1.3 эВ, электронное сродство MoS₂ — 4.2 эВ, электронное сродство hBN — 2–2.3 эВ, ширина запрещенной зоны hBN — 5.2–5.9 эВ и, наконец, работа выхода графена — 4.6 эВ. Исходя из этих данных, обмен носителями между слоями MoS₂ и hBN должен осуществляться путем туннелирования электронов. Для туннелирования дырок нужно прикладывать слишком большие напряжения. Зонная диаграмма для режимов записи ($V_g > 0$) и стирания ($V_g < 0$) приведены на рис. 8, *c*. В структуре, содержащей слой MoS₂, как следует из рис. 8, *b*, наблюдается значительный гистерезис тока, связанный с захватом или выбросом заряда в / из слоя MoS₂. На тестовой структуре без слоя MoS₂ гистерезис не наблюдался. Толщины слоев MoS₂ и hBN, использованные в работе, составили 3–5 монослоев и 6–12 нм соответственно. Слой MoS₂ служит источником или стоком электронов при записи и стирании. Использование импульсов напряжения для записи длительностью от 1 мс до 6 с позволило определить скорость захвата носителей в слой MoS₂. Она составила $10^{11}–10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что превышает типичные значения $10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для систем металл–диэлектрик–полупроводник [64]. Авторы

считают, что создание таких гетероструктур и их использование в качестве элементов памяти возможно и на гибких подложках [63].

Полевой транзистор с каналом из MoS₂, подзатворным диэлектриком из hBN и затвором из графена был собран и исследован в работе [65]. Данный транзистор и другие тестовые варианты транзисторов были сделаны как на подложке SiO₂/Si, так и на гибкой подложке. Схемы структур и зависимости подвижности носителей в канале от толщины канала (количества слоев MoS₂) на подложке SiO₂/Si представлены на рис. 9. Как видно из рисунка, подвижность носителей увеличивалась при использовании более толстых слоев MoS₂, но она не превышала $45 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, хотя, в целом, размещение MoS₂ на слое hBN давало более высокие значения подвижности, чем на SiO₂/Si. Также были изготовлены и исследованы структуры на подложке полиэтиленнафталат (polyethylene naphthalate, PEN) толщиной 127 мкм. Это была структура MBG с тремя монослоями MoS₂ и толщиной hBN 35 нм. Подвижность носителей в такой структуре составила $29 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Была испытана работоспособность структуры при изгибе подложки (см. вставку на рис. 9, *e*). Показано, что параметры транзистора при изгибе, соответствующем растяжению величиной 1.5%, не меняются. Кроме того, как показал анализ, прозрачность таких структур составляла ~ 95% (2.3% поглощение в графене, 2–5% поглощение в MoS₂, поглощением в hBN в видимом диапазоне можно пренебречь [66]). Такие структуры могут быть использованы в

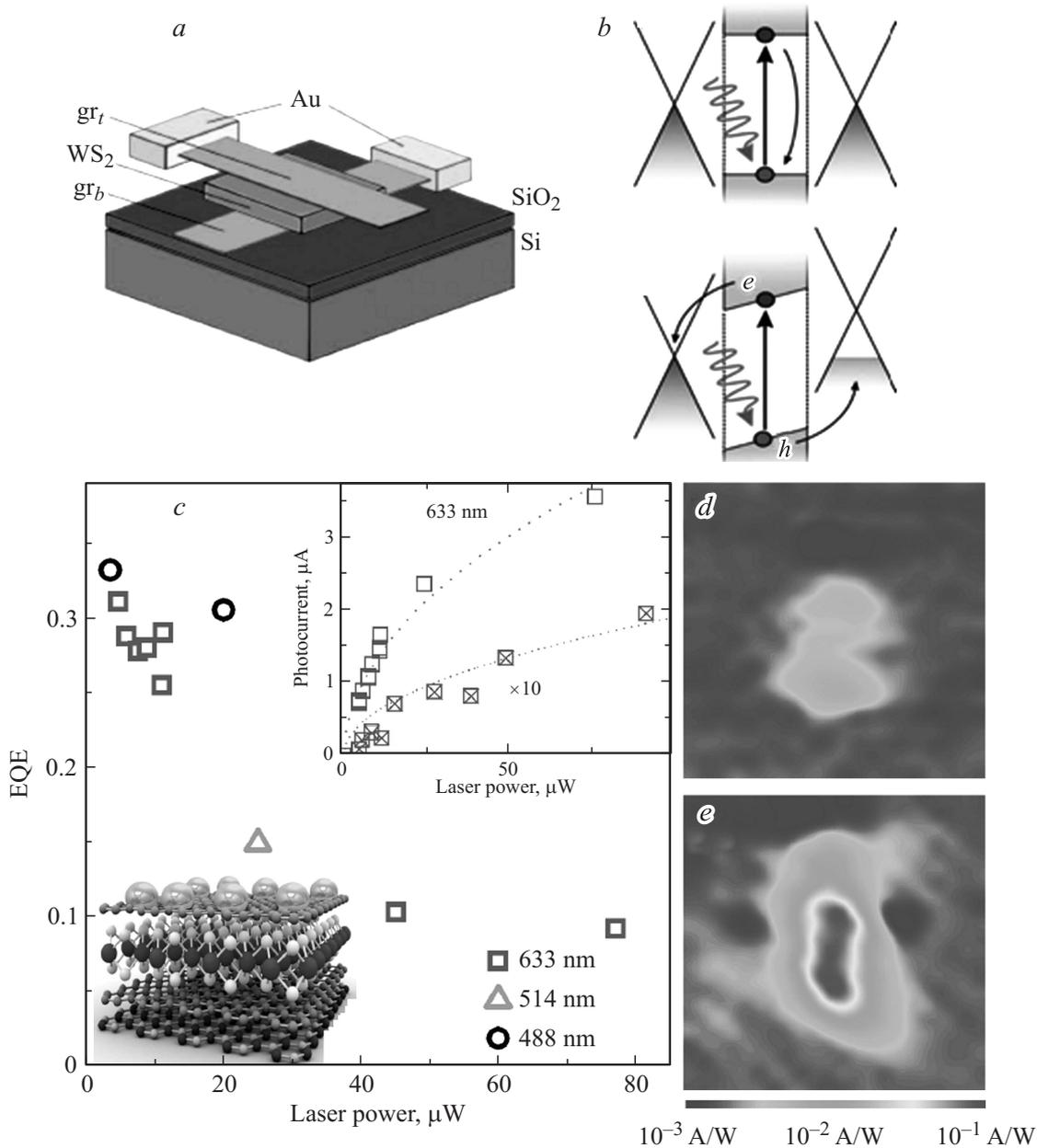


Рис. 10. *a* — схема структуры, состоящей из слоев графен/WS₂/графен. Слой hBN, расположенный между подложкой SiO₂/Si и графеном, не показан. *b* — зонная диаграмма структуры с приложенным напряжением для разделения носителей и без напряжения. *c* — внешний квантовый выход (EQE) в зависимости от мощности возбуждающего лазера. На вставке — зависимость фототока от мощности возбуждающего лазера (пустые символы — структуры на подложке SiO₂/Si, крестики — структуры на гибкой подложке). На второй вставке приведена структура hBN/графен/MoS₂/графен (слои снизу вверх) с резонатором из золотых наночастиц. *d, e* — карта фототока для структуры hBN/графен/MoS₂/графен без (сверху) и с золотыми частицами (ниже) на поверхности. Размер карты 14 × 14 мкм [10].

гибкой электронике и, в частности, могут заменить элементы логики на гибких дисплеях. В настоящее время для элементов логики на гибких дисплеях используются структуры из аморфного кремния, для которых требуется подвижность носителей не менее 10 см²/В · с. Нужно также отметить, что полученная в работе [65] подвижность носителей в транзисторах на гибкой подложке и их прозрачность являются рекордными, по сравнению

с часто наблюдаемой подвижностью 4–12 см²/В · с и прозрачностью ~ 60% [67,68].

В работе [10] показана возможность создавать гетероструктуры для фотовольтаики с высоким внутренним квантовым выходом со слоями WS₂, WSe₂ или MoS₂. Гетероструктуры включали в себя графен / WS₂ (WSe₂, MoS₂)/графен, изолированные снизу слоем hBN. Схема созданных структур и зонная диаграмма для

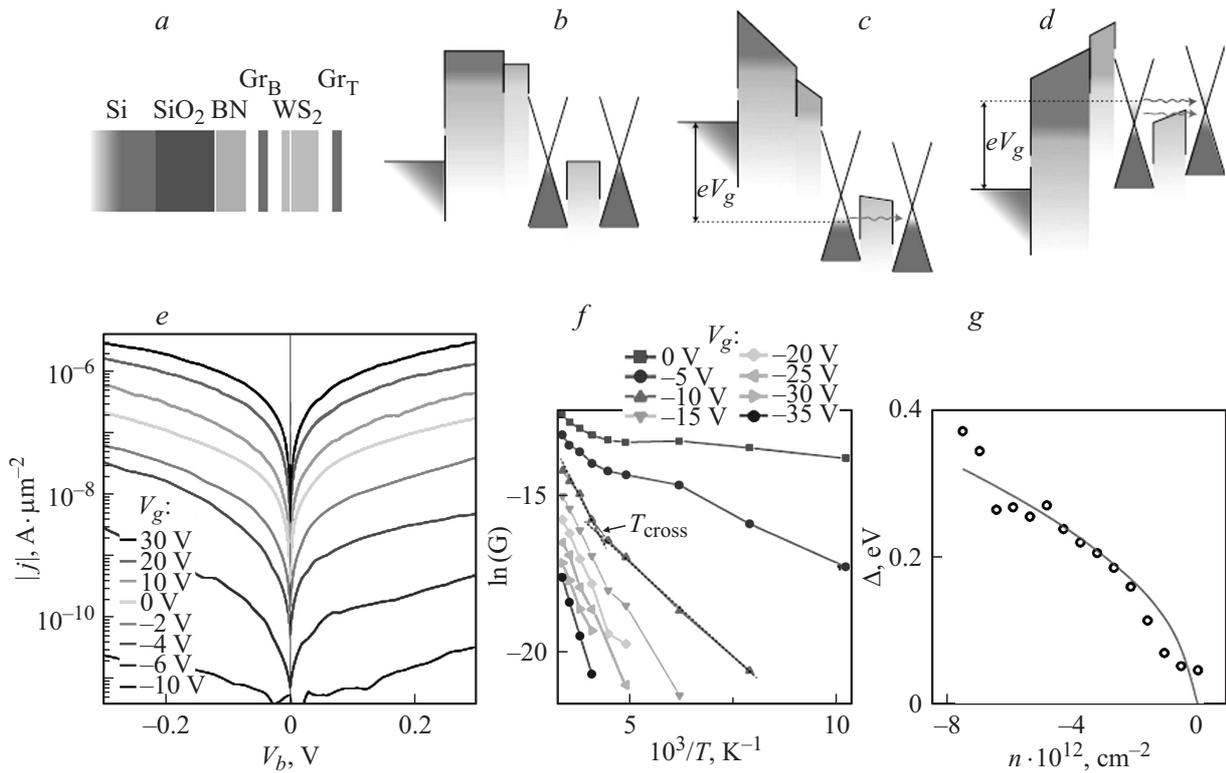


Рис. 11. *a* — схема вертикального транзистора и *b, c, d* — зонные диаграммы транзистора при разных приложенных напряжениях. Затворное напряжение V_g прикладывалось между кремниевой подложкой и нижним слоем графена, напряжение V_b прикладывалось между двумя слоями графена. *e* — вольт-амперные характеристики структуры, измеренные при разных напряжениях на затворе. *f* — температурные зависимости тока, измеренные при разных затворных напряжениях, из наклона которых рассчитывалась эффективная величина туннельного барьера, представленная на (*g*) в зависимости от концентрации носителей в нижнем слое графена (Gr_B) [71].

одной из структур приведены на рис. 10. Носители генерируются лазером в слое полупроводника (WS_2 , WSe_2 или MoS_2) и, в случае приложенного к структуре напряжения, происходит разделение носителей и накопление их в разных слоях графена. Внутренний квантовый выход (отношение количества разделенных электронно-дырочных пар к количеству упавших фотонов) для структур графен/ WS_2 /графен составил 0.2–0.3 при мощности возбуждающего лазера до 10 мкВт (рис. 10, *c*). Аналогичный эффект был получен на структуре hBN /графен/ MoS_2 /графен. Кроме того, в работах [10,69] показано, что фототок можно еще поднять, используя оптический резонатор для увеличения поглощенного света. Резонатор был реализован из слоя hBN на подложке SiO_2/Si и золотых наночастиц на поверхности гетероструктуры hBN /графен/ MoS_2 /графен. Простое увеличение толщины поглощающего вещества (WS_2 или MoS_2) не дает значительного эффекта, так как уменьшается поле, разделяющее носители, и усиливаются рекомбинационные каналы. В результате нанесения наночастиц золота на поверхность структуры фототок возрастает примерно на порядок. Аналогичный прием был использован в работе [70] для создания из графена чувствительного фототранзистора. В этом случае на поверхность графена был нанесен слой квантовых точек

PbS разного размера. На таком фототранзисторе было получено усиление до 10^8 электронов на упавший фотон. Вертикальный туннельный транзистор для гибкой электроники был реализован на гетероструктуре hBN /графен/ WS_2 /графен в работе [71]. Схема и зонные диаграммы без напряжения и с приложенным к структуре напряжением приведены на рис. 11. Ток в данной структуре складывается из туннельного тока через барьер, создаваемый WS_2 , и термоионного тока в WS_2 . При переходе к монослою WS_2 меняется от непрямозонного материала с шириной запрещенной зоны 1.4 эВ к прямозонному материалу с шириной зоны 2.1 эВ [55,72]. Использование такого материала с неширокой запрещенной зоной (по сравнению с hBN) для туннельного барьера позволило существенно улучшить характеристики созданного транзистора. В зависимости от приложенного напряжения меняется эффективная высота (сдвиг уровня Ферми в графене) и ширина (изменение формы барьера) туннельного барьера. В результате впервые для гетероструктур на основе графена наблюдается модуляция тока 10^6 и большой ток в открытом состоянии транзистора. Токи, наблюдаемые в транзисторе при разных напряжениях на затворе, приведены на рис. 11, *d*. Эффективная высота барьера, определяющего ток в структуре, была определена из

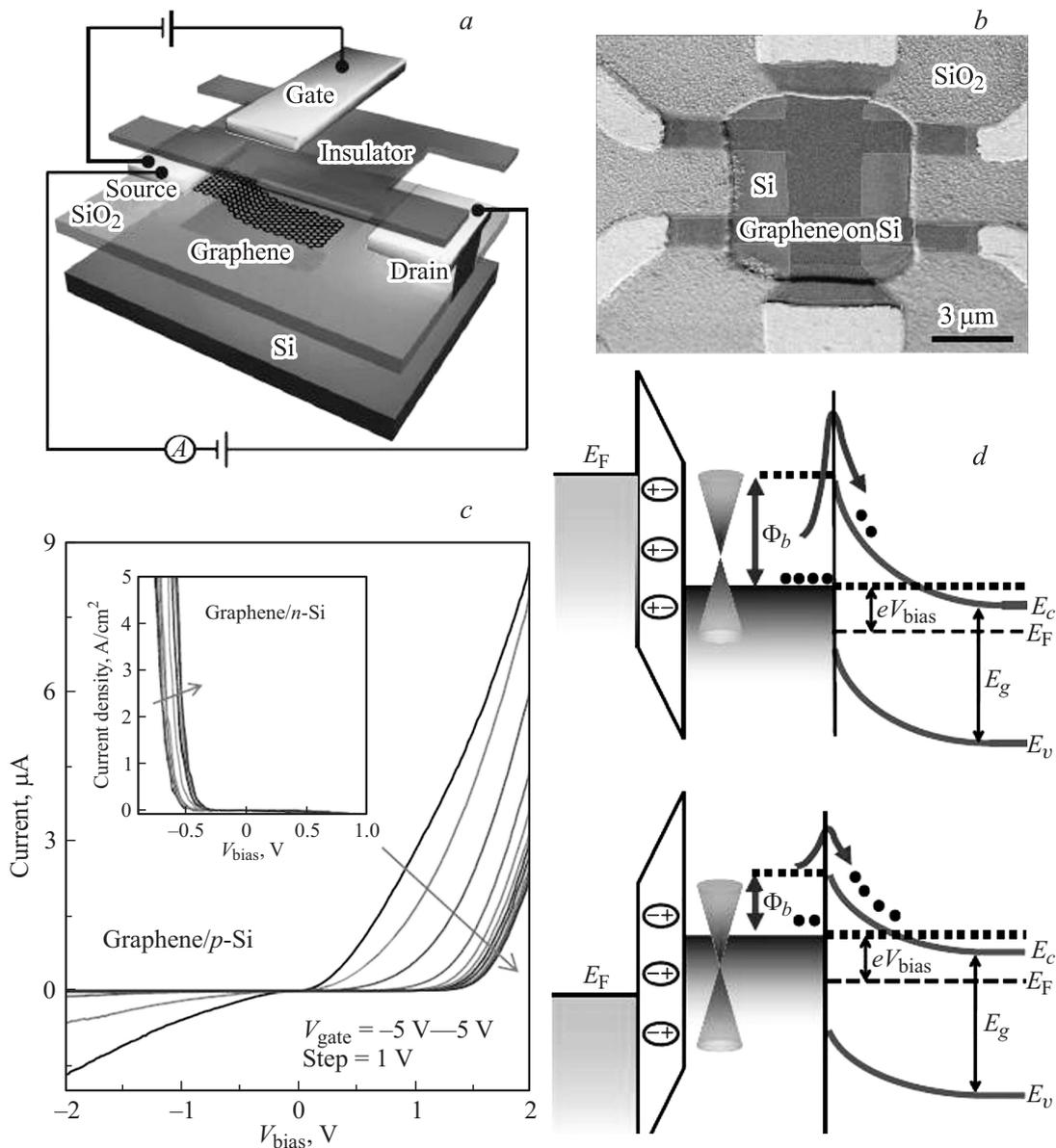


Рис. 12. Схема (a) и внешний вид (b) гетероструктур графена на кремнии. c — ток в графене для разного типа кремния (*p* и *n* на вставке), снятые при разном напряжении на затворе. d — зонные диаграммы барьерной структуры для разной полярности напряжения на затворе [74].

температурных зависимостей тока (рис. 11, e), и ее зависимость от концентрации носителей в нижнем слое графена приведена на рис. 11. Вертикальный туннельный транзистор был создан не только на подложке SiO₂/Si, но и гибкой полимерной подложке полиэтилентерефталата (polyethylene terephthalate, PET). В последнем случае затвор напылялся на обратную сторону полимерной подложки. Было получено, что проводимость такой структуры не менялась при ее изгибе до растяжений ~ 2% и затем несколько уменьшалась. Модуляция тока в таком транзисторе была слабее из-за большей толщины гибкой подложки, игравшей роль подзатворного диэлектрика. В целом транзисторы, созданные с использованием в качестве барьера WS₂, показали лучшие характеристики

по сравнению со структурами, где в качестве барьера использовались слои MoS₂ или hBN.

Недавно был реализован обычный полевой транзистор, собранный полностью из 2D материалов [73]. Сток, исток и затвор были сделаны из графена, канал транзистора из MoS₂, подзатворный диэлектрик из hBN. Для данного транзистора получено большое отношение токов I_{on}/I_{off} — шесть порядков, подвижность носителей в канале составила всего 33 см²/В·с. Авторами также был реализован диод с переходом MoS₂ / WS₂ и графеновыми электродами, демонстрирующий прекрасное выпрямление (отношение прямого и обратного тока ~ 10⁵) и низкую величину тока в закрытом состоянии. Что особенно важно, оба прибора показали низкую

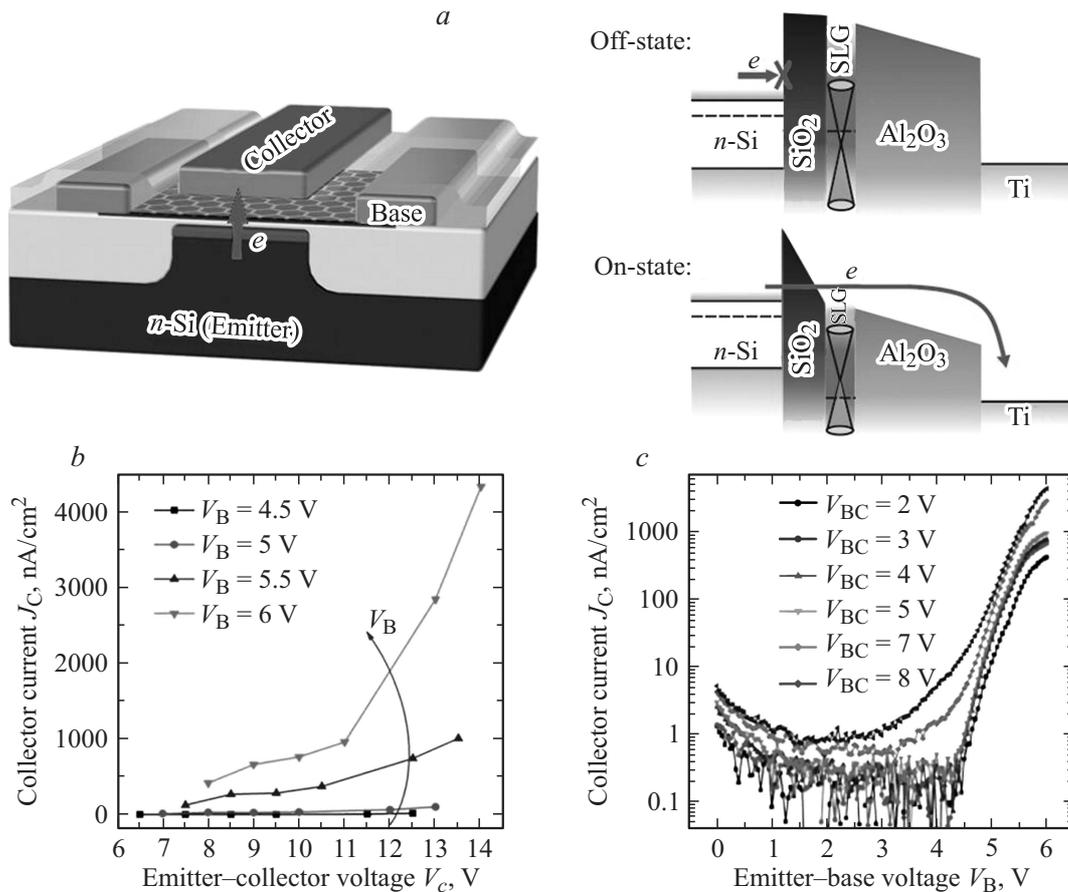


Рис. 13. *a* — схема транзистора на горячих электронах и зонные диаграммы транзистора в состоянии ON и OFF. *b* — выходные характеристики транзистора, полученные для различных напряжений на базе. *c* — передаточные характеристики транзистора для разных значений напряжения между базой и коллектором V_{BC} . Толщины диэлектрических слоев транзистора составляли 5 нм для слоя SiO₂ и 25 нм для слоя Al₂O₃. [84].

плотность состояний на гетерограницах, полученных без согласования решеток переносом монослоев, удерживаемых в одно структуре силами Ван-дер-Ваальса.

5. Барьерные гетероструктуры графен—кремний

Интересные гетероструктуры были получены при размещении графена на кремнии [74]. Работа выхода графена — 4.6 эВ, а электронное средство Si — 4.0 эВ, в результате между графеном и кремнием формируется барьер для кремния *p*- и *n*-типа проводимости. Высота барьера будет меняться при приложении напряжения. Вольт-амперные характеристики для гетероструктур с кремнием *p*- и *n*-типа проводимости представлены на рис. 12, *d*, а зонные диаграммы барьерной структуры для разной полярности напряжения на затворе даны на рис. 12, *d*. Видно, что для этих гетероструктур наблюдается модуляция тока до 10⁵. Авторы [74] показали возможность создавать комплементарные баристоры (вспомогательные устройства для отключения тока в графене, в оригинале barristor, от слова barrier — „ба-

рьер“), элементы логики, инвертеры на целых пластинах кремния диаметром 150 мм. Эти структуры — пример пересмотра базовых принципов работы цифровых переключателей в случае использования монослойных материалов.

6. Сравнение латеральных и вертикальных гетероструктур

Использование обычных планарных конструкций для создания полевых транзисторов с графеном в качестве рабочего канала показали [75–77], что отсутствие запрещенной зоны приводит к слабому управлению током в канале с помощью напряжения на затворе, ток, как правило, меняется всего лишь в несколько раз. Это ограничивает использование графена в транзисторных структурах. Переход к биграфену, нанолентам или другим материалам на основе функционализированного графена с запрещенной зоной позволяет управлять током в канале, но значительно уменьшает подвижность носителей в структуре и тем самым ограничивает рабочий диапазон частот приборных структур [78–80]. В ряде

работ Iannascone [79–83] была промоделирована работа латеральных и вертикальных гетероструктур на основе графена. В результате было показано, что перекрытие между электродами стока, истока и затвора в вертикальных гетероструктурах приводит к взаимной экранировке электрических полей, что ухудшает подпороговые характеристики транзисторов, их быстродействие и несколько уменьшает отношение I_{on}/I_{off} [81]. Авторы предложили новый вариант латерального транзистора с использованием туннельно-прозрачного барьера, встроенного в планарный канал из графена [82,83]. Это может быть просто щель размером несколько нанометров, полоска hBN или другого материала, создающего барьер для движения носителей. Такая конструкция представляет собой следующий шаг в развитии новых принципов построения приборных структур, соединяя преимущества вертикальных и латеральных конструкций. Авторы показали, что использование такой структуры позволяет существенно улучшить параметры транзисторов, но реализация туннельно-прозрачного барьера является относительно сложной задачей с технологической точки зрения. Кроме того, так как монослойные материалы привлекательны для построения именно вертикальных конструкций, следующим шагом, по-видимому, будет вертикальная конструкция с меньшей степенью перекрытия управляющих электродов.

В последнее время был реализован транзистор на горячих электронах с базой из графена. Эта конструкция совместима с существующей планарной кремниевой технологией. На рис. 13 представлена схема транзистора и некоторые его характеристики из работы [84]. Ранее аналогичный прибор был реализован с использованием металла в качестве базы [85], но для его оптимизации требовалось уменьшение толщины базы и увеличение проводимости слоя. Поэтому графен идеально подошел на роль базы. Теоретические оценки предсказывают [86], что использование графена должно обеспечить отношение I_{on}/I_{off} до 5 порядков, а диапазон рабочих частот должен захватить и терагерцовую область. Пока же в работах [84,87] продемонстрировано отношение I_{on}/I_{off} более 4–5 порядков.

7. Контакты к монослоям в гетероструктурах

Один из важных вопросов, возникающих при создании и исследовании вертикальных гетероструктур на основе графена, монослоев полупроводниковых и диэлектрических материалов, является обеспечение хорошего контакта к монослоям. Разные варианты контактов к графену (Ti/Au, Al/Au, Ni/Au, Cu/Au, Pd/Au, Pt/Au) анализировались в работе [88], и было показано, что минимальное сопротивление получается при использовании Ti/Au. Данный вопрос рассмотрен также в работе [89], где, после оптимизации технологии переноса монослоев для сборки гетероструктур и технологии создания контактов была получена подвижность носителей в графене, помещенном между двумя слоями

hBN, $\sim 140\,000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, и слоевое сопротивление около $40\text{ Ом}/\square$ при комнатной температуре и концентрации носителей более $4 \times 10^{12}\text{ см}^{-2}$. Эти значения подвижности носителей близки к теоретическому пределу, связанному с рассеянием на акустических фоновых. При температурах ниже 40 К на таких образцах авторы наблюдали баллистический транспорт на расстояние более 15 мкм [89]. Оптимизация технологии переноса монослоев заключалась в использовании дополнительного защитного слоя из полипропиленкарбоната, избегая тем самым непосредственного контакта графена и hBN с полидиметилсилоксаном (ПДМС), обычно используемым как для переноса CVD выращенного графена с медной фольги [90,91], так и для сборки гетероструктур [4–7]. Известно, что полностью удалить ПДМС с графена практически не удается [90,92]. Использование аналогичных пленок поликарбоната (поли(бифенол-А карбонат)) было предложено именно как „чистый“ способ переноса выращенного графена [93], его модифицированный вариант использовался в работе [94] и действительно получались хорошие параметры перенесенных слоев. Кроме обеспечения „чистоты“ слоев при сборке, авторы [89] использовали обработку в плазме перед напылением контактов, а в качестве контактов использовали 1 нм Cr/15 нм Pd/60 нм Au. Сочетание оптимизированных технологий позволило авторам получить хорошие 1D контакты к монослою графена и рекордно высокие подвижности носителей при комнатной температуре.

8. Заключение

Большой прогресс, наблюдаемый в последнее время в разработке, создании и исследовании вертикальных гетероструктур на основе графена, отражает огромные возможности и перспективы развития данного направления. Полученные гетероструктуры демонстрируют неожиданные и интересные свойства, возможности нового дизайна приборных структур, снимают ограничения использования графена в электронике, связанные с отсутствием запрещенной зоны, и значительно расширяют перспективы применения графена и других монослойных материалов. Дальнейший прогресс данного направления опирается, с одной стороны, на разработку новых, и более сложных и интересных гетероструктур, а с другой — на развитие методов получения монослойных материалов, а также методов и подходов для сборки монослоев в единую структуру. Пока для сборки используется механический перенос слоев, в дальнейшем необходимо развитие методов роста (синтеза) требуемой многослойной гетероструктуры. В целом, как следует из изложенного в работе материала, в настоящее время происходит пересмотр принципов организации различных приборных структур с использованием графена и перспектив развития данного направления. Благодарности

Автор выражает благодарность за поддержку Министру образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

- [1] K.S. Novoselov, V.I. Fal'ko, L. Colombo, P.R. Gellert, M.G. Schwab, K. Kim. *Nature*, **490**, 192 (2012).
- [2] K.C. Новоселов. УФН, **181**, 1299 (2011).
- [3] A.K. Geim, I.V. Grigorieva. *Nature*, **499**, 419 (2013).
- [4] H. Wang, T. Taychatanapat, A. Hsu, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Jarillo-Herrero, T. Palacios. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **32**, 1209 (2011).
- [5] L. Britnell, R.V. Gorbachev, R. Jalil, B.D. Belle, F. Schedin, A. Mishchenko, T. Georgiou, M.I. Katsnelson, L. Eaves, S.V. Morozov, N.M.R. Peres, J. Leist, A.K. Geim, K.S. Novoselov, L.A. Ponomarenko. *Science*, **335**, 947 (2012).
- [6] L. Britnell, R.V. Gorbachev, R. Jalil, B.D. Belle, F. Schedin, M.I. Katsnelson, L. Eaves, S.V. Morozov, A.S. Mayorov, N.M.R. Peres, A.H. Castro Neto, J. Leist, A.K. Geim, L.A. Ponomarenko, K.S. Novoselov. *Nano Lett.*, **12**, 1707 (2012).
- [7] S.J. Haigh, A. Gholinia, R. Jalil, S. Romani, L. Britnell, D.C. Elias, K.S. Novoselov, L.A. Ponomarenko, A.K. Geim, R. Gorbachev. *Nature Materials*, **11**, 764 (2012).
- [8] J. Kang, S. Tongay, J. Zhou, J. Li, J. Wu. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 012 111 (2013).
- [9] M.S. Choi, G.-H. Lee, Y.-J. Yu, D.-Y. Lee, S.H. Lee, P. Kim, J. Hone, W.J. Yoo. *Nature Commun*, **4**, 1624 (2013).
- [10] L. Britnell, R.M. Ribeiro, A. Eckmann, R. Jalil, B.D. Belle, A. Mishchenko, Y.-J. Kim, R.V. Gorbachev, T. Georgiou, S.V. Morozov, A.N. Grigorenko, A.K. Geim, C. Casiraghi, A.H. Castro Neto, K.S. Novoselov. *Science*, **340**, 1311 (2013).
- [11] I.V. Antonova, I.A. Kotin, R.A. Soots, V.Ya. Prinz. *Nanotechnology*, **23**, 315 601 (2012).
- [12] I.V. Antonova, S.V. Mutilin, V.A. Seleznev, R.A. Soots, V.A. Volodin, V.Ya. Prinz. *Nanotechnology*, **22**, 285 502 (2011).
- [13] N.A. Nebogatikova, I.V. Antonova, V.A. Volodin, V.Y. Prinz. *Physica E*, **52**, 106 (2013).
- [14] I.A. Kotin, I.V. Antonova, A.I. Komonov, V.A. Seleznev, R.A. Soots, V.Ya. Prinz. *J Phys. D: Appl. Phys.*, **46**, 285 303 (2013).
- [15] R. Decker, Y. Wang, V.W. Brar, W. Regan, H.-Z. Tsai, Q. Wu, W. Gannett, A. Zettl, M.F. Crommie. *Nano Lett.*, **11**, 2291 (2011).
- [16] C.R. Dean, A.F. Young, I. Meric, C. Lee, L. Wang, S. Sorgenfrei, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Kim, K.L. Shepard, J. Hone. *Nature Nanotechnology*, **5**, 722 (2010).
- [17] G.-H. Lee, Y.-J. Yu, C. Lee, C. Dean, K.L. Shepard, P. Kim, J. Hone. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 243 114 (2011).
- [18] M. Hirose. *Mater. Sci. Eng. B*, **41**, 35 (1996).
- [19] S.N. Mohammad, F.J. Kub, C.R. Eddy, J. Vac. Sci. Technol. B, **29**, 021 021 (2011).
- [20] K. Watanabe, T. Taniguchi, H. Kanda. *Nature Materials*, **3**, 404 (2004).
- [21] G. Giovannetti, P.A. Khomyakov, G. Brocks, P.J. Kelly, J. van den Brink. *Phys. Rev. B*, **76**, 073 103 (2007).
- [22] D.C. Ferry. *IEEE Nanotech.*, **12**, 1932 (2012).
- [23] W. Gannett, W. Regan, K. Watanabe, T. Taniguchi, M.F. Crommie, A. Zettl. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 242 105 (2011).
- [24] A.S. Mayorov, R.V. Gorbachev, S.V. Morozov, L. Britnell, R. Jalil, L.A. Ponomarenko, P. Blake, K.S. Novoselov, K. Watanabe, T. Taniguchi, A.K. Geim. *Nano Lett.*, **11**, 2396 (2011).
- [25] N. Petrone, C. Dean, I. Meric, A.M. van der Zande, P.Y. Huang, L. Wang, D. Muller, K.L. Shepard, J. Hone. *Nano Lett.*, **12**, 275 (2012).
- [26] Yi. Zhang, L. Zhang, P. Kim, M. Ge, Z. Li, C. Zhou. *Nano Lett.*, **12**, 2810 (2012).
- [27] E. Kim, T. Yu, E.S. Song, B. Yu. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 262 103 (2011).
- [28] K.H. Lee, H.J. Shin, J. Lee, I.Y. Lee, G.H. Kim, J.Y. Choi, S.W. Kim. *Nano Lett.*, **12**, 714 (2012).
- [29] M. Wang, S.K. Jang, W.-J. Jang, M. Kim, S.-Y. Park, S.-W. Kim, S.-J. Kahng, J.-Y. Choi, R. S. Ruoff, Y.J. Song, S. Lee. *Advanced Mater.*, **25**, 2746 (2013).
- [30] L. Britnell, R.V. Gorbachev, A.K. Geim, L.A. Ponomarenko, A. Mishchenko, M.T. Greenaway, T.M. Fromhold, K.S. Novoselov, L. Eaves. *Nature Commun.*, **4**, 1794 (2013).
- [31] P. Zhao, R.M. Feenstra, G. Gu, D. Jena. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **60**, 951 (2013).
- [32] R.M. Feenstra, D. Jena, G. Gu. *J. Appl. Phys.*, **111**, 043 711 (2012).
- [33] M.P. Levendorf, C.-J. Kim, L. Brown, P.Y. Huang, R.W. Havener, D.A. Muller, J. Park. *Nature*, **488**, 627 (2012).
- [34] Z. Liu, L. Ma, G. Shi, W. Zhou, Y. Gong, S. Lei, X. Yang, J. Zhang, J. Yu, K.P. Hackenberg, A. Babakhani, J.-C. Idrobo, R. Vajtai, J. Lou, P.M. Ajayan. *Nature Nanotechnology*, **8**, 119 (2013).
- [35] B. Hunt, J.D. Sanchez-Yamagishi, A.F. Young, M. Yankowitz, B.J. LeRoy. *Science*, **340**, 1427 (2013).
- [36] K.I. Bolotin, K.J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, H.L. Stormer. *Sol. St. Commun.*, **146**, 351 (2008).
- [37] X. Du, A. Barker, I. Skachko, E.Y. Andrei. *Nature Nanotechnology*, **3**, 491 (2008).
- [38] J.-H. Chen, C. Jang, S. Xiao, M. Ishigami, M.S. Fuhrer. *Nature Nanotechnology*, **3**, 206 (2008).
- [39] E.H. Hwang, S. Adam, S. Das Sarma. *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 186 806 (2007).
- [40] L. Wang, Z. Chen, C.R. Dean, T. Taniguchi, K. Watanabe, L. Brus, J. Hone. *ACS Nano*, **6**, 9314 (2012).
- [41] S. Fratini, F. Guinea. *Phys. Rev. B*, **77**, 195 415 (2008).
- [42] A.K. Geim, K.S. Novoselov. *Nature Materials*, **6**, 183 (2007).
- [43] S.V. Morozov, K.S. Novoselov, M.I. Katsnelson, F. Schedin, D.C. Elias, J.A. Jaszczak, A.K. Geim, *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 016 602 (2008).
- [44] V. Singh, D. Joung, L. Zhai, S. Das, S.I. Khondaker, S. Seal. *Progr. Mater. Sci.*, **56**, 1178 (2011).
- [45] S. Chen, H. Ji, H. Chou, Q. Li, H. Li, J.W. Suk, R. Piner, L. Liao, W. Cai, R.S. Ruoff, *Advanced Mater.*, **25**, 2062 (2013).
- [46] D.R. Cooper, B. D'Anjou, N. Ghattamaneni. *Condensed Matter Phys.*, **2**, 56 (2012).
- [47] H. Zhou, W.J. Yu, L. Liu, R. Cheng, Y. Chen, X. Huang, Y. Liu, Y. Wang, Y. Huang, X. Duan. *Nature Commun.*, **4**, 2096 (2013).
- [48] I.V. Antonova, I.A. Kotin, R.A. Soots, V.Ya. Prinz. *Fullerenes. Nanotubes, and Carbon Nanostructures*, **20**, 543 (2012).
- [49] И.А. Котин, И.В. Антонова, Р.А. Соотс, В.А. Володин, В.Я. Принц. *Рос. нанотехнологии*, **8**, 26 (2013).
- [50] А.И. Подливаев, Л.А. Опенов. *ФТП*, **45**, 988 (2011).
- [51] K.F. Mak, M.Y. Sfeir, Y. Wu, C.H. Lui, J.A. Misewich, T.F. Heinz. *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 136 805 (2010).
- [52] R. Gordon, D. Yang, E. Crozier, D. Jiang, R. Frind. *Phys. Rev. B*, **65**, 125 407 (2002).

- [53] W. Zhao, Z. Ghorannevis, L. Chu, M. Toh, C. Kloc, P.-H. Tan, G. Eda. *ACS Nano*, **7**, 791 (2013).
- [54] P. Tonndorf, R. Schmidt, P. Böttger, X. Zhang, J. Börner, A. Liebig, M. Albrecht, C. Kloc, O. Gordan, D.R.T. Zahn, S.M. de Vasconcellos, R. Bratschitsch. *Opt. Express*, **21**, 4908 (2013).
- [55] J. Kang, S. Tongay, J. Zhou, J. Li, J. Wu. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 012 111 (2013).
- [56] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, A. Kis. *Nature Nanotechnology*, **6**, 147 (2011).
- [57] Y. Yoon, K. Ganapathi, S. Salahuddin. *Nano Lett.*, **11**, 3768 (2011).
- [58] D.J. Late, B. Liu, H.S.S.R. Matte, V.P. Dravid, C.N.R. Rao. *ACS Nano*, **6**, 5635 (2012).
- [59] W. Bao, X. Cai, D. Kim, K. Sridhara, M.S. Fuhre. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 042104 (2013).
- [60] B. Radisavljevic, M.B. Whitwick, A. Kis. *ACS Nano*, **5**, 9934 (2011).
- [61] Z.Y. Yin, H. Li, H. Li, L. Jiang, Y.M. Shi, Y.H. Sun, G. Lu, Q. Zhang, X.D. Chen, H. Zhang. *ACS Nano*, **6**, 74 (2012).
- [62] O. Lopez-Sanchez, D. Lembke, M. Kayci, A. Radenovic, A. Kis. *Nature Nanotechnology*, **8**, 497 (2013).
- [63] M.S. Choi, G.H. Lee, Y.J. Yu, D.Y. Lee, S.H. Lee, P. Kim, J. Hone, W.J. Yoo. *Nature Commun.*, **4**, 1624 (2013).
- [64] Y.C. Kong, L.Q. Hu, Y.D. Zheng, C.H. Zhou, C. Chen, S.L. Gu, R. Zhang, P. Han, R.L. Jiang, Y. Shi. *Appl. Phys. A*, **90**, 545 (2008).
- [65] G.-H. Lee, Y.-J. Yu, X. Cui, N. Petrone, C.-H. Lee, M.S. Choi, D.-Y. Lee, C. Lee, W.J. Yoo, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Nuckolls, P. Kim, J. Hone. *ACS Nano*, **5**, 9934 (2011).
- [66] Z. Remes, M. Nesladek, K. Haenen, K. Watanabe, T. Taniguchi. *Phys. Status Solidi A*, **202**, 2229 (2005).
- [67] J. Pu, Y.J. Zhang, Y. Wada, J.T.W. Wang, L.J. Li, Y. Iwasa, T. Takenobu. *Nano Lett.*, **12**, 4013 (2012).
- [68] J. Yoon, W. Park, G.-Y. Bae, Y. Kim, H.S. Jang, Y. Hyun, S.K. Lim, Y.H. Kahng, W.-K. Hong, B.H. Lee, H.C. Ko. *Small*, **9**, 3295 (2013).
- [69] J.M. Hamm, O. Hess. *Science*, **340**, 1298 (2013).
- [70] G. Konstantatos, M. Badioli, L. Gaudreau, J. Osmond, M. Bernechea, F.P. Garcia de Arquer, F. Gatti, F.H.L. Koppens. *Nature Nanotechnology*, **7**, 363 (2012).
- [71] T. Georgiou, R. Jalil, B.D. Belle, L. Britnell, R.V. Gorbachev, S.V. Morozov, Y.-J. Kim, A. Gholinia, S.J. Haigh, O. Makarovskiy, L. Eaves, L.A. Ponomarenko, A.K. Geim, K.S. Novoselov, A. Mishchenko. *Nature Nanotechnology*, **8**, 100 (2013).
- [72] A. Kuc, N. Zibouche, T. Heine. *Phys. Rev. B*, **83**, 245 213 (2011).
- [73] T. Roy, M. Tosun, J.S. Kang, A.B. Sachid, S.B. Desai, M. Hettick, C.C. Hu, A. Javey. *ACS Nano*, **8**, 6259 (2014).
- [74] H. Yang, J. Heo, S. Park, H.J. Song, D.H. Seo, K.-E. Byun, P. Kim, I. Yoo, H.-J. Chung, K. Kim. *Science*, **336**, 1140 (2012).
- [75] D.B. Farmer, A. Valdes-Garcia, C. Dimitrakopoulos, P. Avouris. *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 143 503 (2012).
- [76] Y.-M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K.A. Jenkins, D.B. Farmer, H.-Y. Chiu, A. Grill, Ph. Avouris. *Science*, **327**, 662 (2010).
- [77] C.-C. Lu, Y.-C. Lin, C.-H. Yeh, J.-C. Huang, P.-W. Chiu. *ACS Nano*, **6**, 4469 (2012).
- [78] F. Schwierz. *Nature Nanotechnology*, **5**, 487 (2010).
- [79] G. Fiori, G. Iannaccone. *Proc. IEEE*, **101**, 1653 (2013).
- [80] G. Fiori, D. Neumaier, B.N. Szafranek, G. Iannaccone. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **61**, 729 (2014).
- [81] G. Fiori, S. Bruzzone, G. Iannaccone. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **60**, 268 (2013).
- [82] G. Fiori, A. Betti, S. Bruzzone, G. Iannaccone. *ACS Nano*, **6**, 2642 (2012).
- [83] A. Paussa, G. Fiori, P. Palestri, M. Geromel, D. Esseni, G. Iannaccone, L. Selmi. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **61**, 1567 (2014).
- [84] S. Vaziri, G. Lupina, C. Henke, A.D. Smith, M. Ostling, J. Dabrowski, G. Lippert, W. Mehr, M.C. Lemme. *Nano Lett.*, **13**, 1435 (2013).
- [85] T. Yajima, Y. Hikita, H.Y. Hwang. *Nature Mater.*, **10**, 198 (2011).
- [86] W. Mehr, J. Dabrowski, J.C. Scheytt, G. Lippert, Y.-H. Xie, M.C. Lemme, M. Ostling, G. Lupina. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **33**, 691 (2012).
- [87] C. Zeng, E.B. Song, M. Wang, S. Lee, C.M. Torres, jr., J. Tang, B.H. Weiller, K.L. Wang. *Nano Lett.*, **13**, 2370 (2013).
- [88] J.A. Robinson, M. LaBella, M. Zhu, M. Hollander, R. Kasurda, Z. Hughes, K. Trumbull, R. Cavalero, D. Snyder. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 053103 (2011).
- [89] L. Wang, I. Meric, P.Y. Huang, Q. Gao, Y. Gao, H. Tran, T. Taniguchi, K. Watanabe, L.M. Campos, D.A. Muller, J. Guo, P. Kim, J. Hone, K.L. Shepard, C.R. Dean. *Science*, **342**, 614 (2013).
- [90] J.W. Suk, A. Kitt, C.W. Magnuson, Y. Hao, S. Ahmed, J. An., A.K. Swan, B.B. Goldberg, R.S. Ruoff. *ACS Nano*, **5**, 6916 (2011).
- [91] Y. Lee, S. Bae, H. Jang, S. Jang, S.-E. Zhu, S.H. Sim, Y.I. Song, B.H. Hong, J.-H. Ahn. *Nano Lett.*, **10**, 490 (2010).
- [92] M. Ishigami, Shaul Aloni, A. Zettl. *Nano Lett.*, **7**, 1643 (2007).
- [93] Y.C. Lin, C.H. Jin, J.C. Lee, S.F. Jen, P.W. Chiu. *ACS Nano*, **5**, 2362 (2011).
- [94] И.В. Антонова, С.В. Голод, Р.А. Соотс, А.И. Комонов, В.А. Селезнев, М.А. Сергеев, В.А. Володин, В.Я. Принц. *ФТП*, **48**, 827 (2014).

Редактор Т.А. Полянская

Vertical heterostructures used graphene and other monolayer materials

*I.V. Antonova**+

* Rzhanov Institute of Semiconductor Physics
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia
* Novosibirsk State University
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Advantages in vertical graphene based heterostructures with use of different dielectric and semiconductor monolayers of other materials (hexagonal boron nitride, transition metal dichalcogenides and other) are discussed in the review. Significant progress in development and study of vertical heterostructures and huge potential for a wide spectrum of applications are first of all based on new principles of design of device structures for monolayer materials.