

18,13

Влияние интеркаляции золота на электронную структуру графена на Co—Si/SiC(0001)

© А.А. Рыбкина, С.О. Фильнов, Д.А. Глазкова, О.Ю. Вилков, К.А. Бокай,
Д.А. Пудиков, А.М. Шикин, А.Г. Рыбкин

Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a.rybkina@spbu.ru

Поступила в Редакцию 7 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 7 апреля 2022 г.

Принята к публикации 11 апреля 2022 г.

Проведено исследование графена на ультратонком слое силицидов кобальта CoSi/CoSi₂ на подложке SiC(0001) после интеркаляции атомов Au. Показано, что напыление Au и последующий отжиг системы при температуре 500°C приводит к интеркаляции атомов Au и формированию под графеном силицида золота со стехиометрией, близкой к Au₂Si. Исследование электронной структуры системы в области точки \bar{K} поверхностной зоны Бриллюэна показало квазисвободный характер графена с линейным спектром π состояний и точкой Дирака вблизи уровня Ферми. Проведенные исследования с помощью фотоэлектронной микроскопии показали однородность работы выхода вдоль поверхности образца на микрометровом масштабе.

Ключевые слова: графен, магнитно-спин-орбитальный графен, интеркаляция, фотоэлектронная спектроскопия, электронная структура.

DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52716.337

1. Введение

Графен является одним из перспективных материалов для применения в посткремниевой электронике и спинтронике [1–3]. Линейный закон дисперсии электронных состояний в графене обеспечивает высокую подвижность носителей заряда и бездиссипативный электронный транспорт. При этом графен, будучи немагнитным материалом со слабым спин-орбитальным взаимодействием, не мог бы рассматриваться как активный элемент спинтроники. Однако гигантское спиновое расщепление электронных состояний, наблюдаемое в графене при контакте с тяжелыми и магнитными металлами при комнатной температуре, открывает широкие перспективы для его использования в устройствах спинтроники, в частности, в области хранения информации и квантовых вычислений [4–9]. Одной из перспективных реализаций графена в спинтронике является магнитно-спин-орбитальный графен [10], который содержит хорошо упорядоченный графен, контактирующий с сильным ферромагнетиком (кобальтом) и тяжелым металлом (золотом). При взаимодействии с кобальтом и золотом графен не только сохраняет свои уникальные характеристики, но и частично перенимает свойства этих металлов — магнетизм и спин-орбитальное взаимодействие. Для проведения транспортных измерений на магнитно-спин-орбитальном графене перед нами стояла первоочередная задача синтезировать такой графен на изолирующей подложке. Поэтому реализация магнитно-спин-орбитального графена на полупроводниковой монокристаллической подложке SiC(0001) является ожидаемой

и вполне актуальной задачей. Кроме того, комбинация сильного спин-орбитального взаимодействия и магнетизма в графен-содержащей системе на SiC может стать перспективной площадкой для наблюдения квантового аномального эффекта Холла в графене (QANE) [11,12].

Для решения данной задачи в первую очередь нами была осуществлена интеркаляция атомов Co под буферный слой графена на подложке 6H-SiC(0001) [13,14]. Буферный слой графена — это $(6\sqrt{3} \times 6\sqrt{3} R30^\circ)$ графеноподобная реконструкция поверхности, получаемая в ходе отжига и графитизации монокристалла SiC [15,16]. Благодаря интеркаляции кобальта под буферный слой происходит его трансформация в монослой графена. В результате такого синтеза происходит формирование квазисвободного монослойного графена на магнитном ультратонком слое силицидов кобальта со стехиометрией близкой к CoSi/CoSi₂. Было обнаружено ферромагнитное упорядочение магнитных моментов в плоскости поверхности синтезированной системы, обусловленное слоем CoSi под графеном.

В настоящей работе выполнен следующий шаг по синтезу и изучению магнитно-спин-орбитального графена на полупроводниковой подложке. Проведена последующая интеркаляция атомов Au в систему графен/CoSi/CoSi₂/SiC(0001). Как известно, интеркаляция золота под графен на металлических подложках Co(0001), Ni(111) [8–10,17] и неметаллических подложках [18] приводит к индуцированному спин-орбитальному взаимодействию в графене и гигантскому расщеплению по спину электронных π состояний графена в окрестности точки Дирака. Ожидается, что интерка-

ляция золота усилит спин-орбитальное взаимодействие в исследуемой системе и приведет к модификации электронной и спиновой структуры системы. Результаты данной работы являются важным этапом для создания магнитно-спин-орбитального графена на полупроводниковой подложке и для дальнейшего измерения спиновой электронной структуры и транспортных свойств полупроводниковой системы.

2. Методы исследования

Синтез образца и предварительные фотоэмиссионные исследования были проведены *in situ* в условиях сверхвысокого вакуума на фотоэлектронном спектрометре „Универ-М“ в ресурсном центре „Физические методы исследования поверхности“ (РЦ ФМИП) Научного парка СПбГУ. Для синтеза использовались коммерческие полупроводящие пластины 6H-SiC(0001) *n*-типа производства компании TankeBlue Semiconductor Co. Ltd. Толщина наносимых слоев золота контролировалась по кварцевым микровесам. Температура отжига определялась с помощью пирометра Keller CellaTemp RA 20 AF 2/C. Исследования методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) были проведены при комнатной температуре в РЦ ФМИП на уникальной научной установке „Нанолаб“, которая оборудована полусферическим энергоанализатором VG Scienta R4000 с микроканальным детектором и узкополосным высокоинтенсивным источником ультрафиолетового излучения с монохроматором. Исследования методом фотоэлектронной спектроскопии внутренних уровней (XPS) высокого разрешения проводились при комнатной температуре на станции RG-PES на российско-немецком канале вывода в центре синхротронного излучения Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (BESSY II). Калибровка измеренных XPS спектров проводилась по положению уровня Ферми. Анализ фотоэлектронных спектров внутренних уровней проводился с помощью процедуры разложения спектров на спектральные компоненты. Форма линий спектров определялась формулой произведения функций асимметричных Гаусса и Лоренца [19,20]. Параметр асимметрии графенового пика на спектрах C 1s составил 0.08. Исходные экспериментальные точки спектров показаны на рисунках линией с круглыми маркерами вместе с результатами разложения на компоненты и фоном. Измерения с помощью фотоэлектронной микроскопии (PEEM) проводились с использованием станции Omicron FOCUS IS-PEEM в центре синхротронного излучения BESSY II. В качестве источника фотонов использовалась газоразрядная Hg лампа ($h\nu = 4.9$ eV).

3. Результаты и обсуждение

В данной работе проведена интеркаляция атомов золота путем напыления пленки толщиной 3.2 Å на

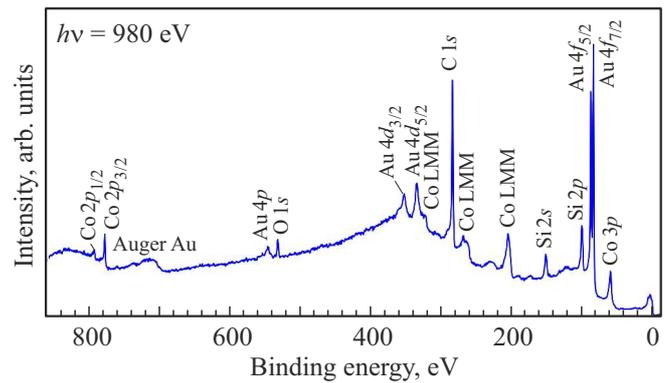


Рис. 1. Обзорный XPS-спектр внутренних уровней для системы после напыления золота и прогрева при $T = 500^\circ\text{C}$, измеренный при энергии фотонов 980 eV. В спектре присутствуют основные спектральные линии, характерные для атомов углерода, кремния, золота и кобальта.

предварительно обезгаженную и охарактеризованную поверхность системы графен/CoSi/CoSi₂/SiC. После этого производился отжиг системы при 450°C и 500°C в течение 15 min при каждой температуре.

На рис. 1 показан обзорный фотоэлектронный спектр для системы, полученной после напыления Au и отжига при $T = 500^\circ\text{C}$. В спектре, кроме пиков углерода, кремния и кобальта, появились пики золота. Небольшой пик кислорода присутствовал и в исходной системе и, возможно, связан с переносом образца в форвакуумных условиях.

В работе проведен подробный анализ фотоэлектронных спектров в области C 1s-, Si 2p-, Au 4f-, Co 2p-уровней после напыления Au и отжига системы при $T = 500^\circ\text{C}$. Фотоэлектронные спектры измерялись при двух значениях энергий фотонов — 420 eV для увеличения поверхностной чувствительности и 980 eV для элементного анализа. Измерения при энергии фотонов 420 eV отличаются большей интенсивностью потока фотонов на канале вывода синхротронного излучения. Однако длина свободного пробега возбужденных фотоэлектронов оказывается меньше, чем при использовании энергии возбуждения 980 eV. В связи с этим в спектрах C 1s-сигнал от нижележащей подложки SiC слишком мал. Кроме того, энергии фотонов 420 eV недостаточно для измерения диапазона энергий, соответствующего уровню Co 2p. Поэтому для анализа полного набора XPS-спектров, в том числе спектров C 1s и Co 2p, проводились измерения при энергии фотонов 980 eV.

На рис. 2 показаны XPS-спектры, измеренные по нормали к поверхности в области энергий C 1s-, Si 2p-, Au 4f-уровней с использованием энергии фотонов 420 eV.

Спектр C 1s после напыления Au и отжига системы (рис. 2, a) представляет собой однокомпонентный асимметричный пик с энергией связи 284.3 eV, что на 0.1 eV

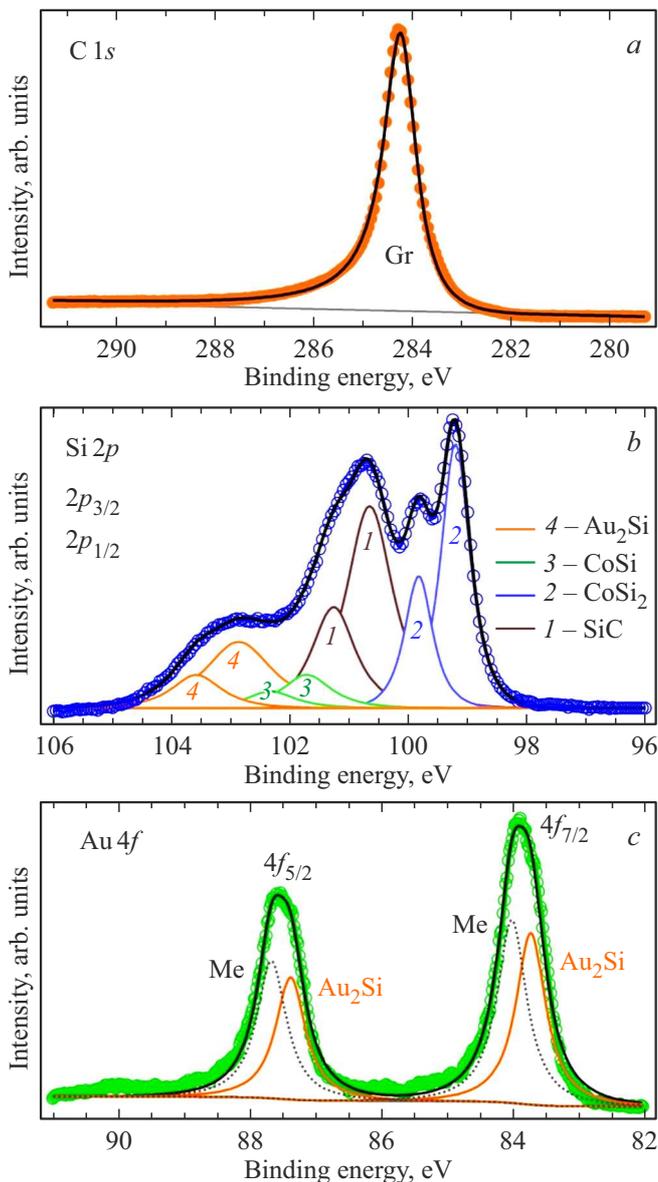


Рис. 2. Фотоэлектронные спектры $C 1s$, $Si 2p$, $Au 4f$ с высоким разрешением, измеренные по нормали к поверхности. Энергия фотонов 420 eV.

меньше, чем энергия связи атомов углерода в графене до напыления Au [13]. Спектр $Si 2p$, показанный на рис. 2, *b*, имеет сложную многокомпонентную структуру. Для того, чтобы идентифицировать каждую из компонент, необходимо обратиться к анализу спектра $Si 2p$ до напыления Au. В работе [13] было показано, что в результате интеркаляции кобальта под буферный слой графена в спектре $Si 2p$ появляются две новые компоненты слева и справа от основного пика SiC. Компонента при меньшей энергии связи (-1.45 eV) соответствует соединению $CoSi_2$, а при большей энергии связи ($+1.05$ eV) соответствует соединению $CoSi$. После напыления Au и отжига системы в спектре $Si 2p$ появилась дополнительная компонента при энергии связи

102.87 eV (энергия указана для $Si 2p_{3/2}$), см. рис. 2, *b*. Анализ спектра $Au 4f$ на рис. 2, *c*, измеренного с более высоким энергетическим разрешением, показывает, что система характеризуется атомами золота в двух состояниях. Каждая из линий дублета $Au 4f$ состоит из двух компонент. Высокоэнергетические компоненты $Au 4f_{7/2}$ и $Au 4f_{5/2}$ при энергиях связи 84 и 87.6 eV соответствуют атомам золота в металлическом состоянии. Эти атомы, предположительно, находятся на поверхности графена и не интеркалированы под графеновый монослой. Низкоэнергетическая пара компонент, сдвинутая на 0.28 eV, т.е. при энергиях связи 87.32 и 83.72 eV соответствует атомам золота, которые взаимодействуют с подложкой с образованием химической связи.

Полученные результаты разложения XPS-спектров $Si 2p$ - и $Au 4f$ -уровней на спектральные компоненты при энергии фотонов 420 eV были использованы для анализа XPS-спектров, измеренных при энергии фотонов 980 eV. На рис. 3 показаны фотоэлектронные спектры, измеренные при энергии фотонов 980 eV в области $C 1s$, $Si 2p$, $Au 4f$ и $Co 2p$ внутренних уровней. Спектр $C 1s$ на рис. 3, *a* имеет характерную форму для графена на SiC [15,16,21,22]: пик, соответствующий атомам углерода в графене, имеет энергию связи 284.3 eV, и пик, соответствующий углероду в объеме SiC, имеет энергию связи 282.9 eV. При энергии фотонов 980 eV в спектре углерода удается различить сигнал не только от графенового слоя, но и от подложки SiC, что является существенным при дальнейшем анализе фотоэлектронных спектров. Спектр $Si 2p$ на рис. 3, *b* также имеет многокомпонентную форму, как и на рис. 2, *b*, однако отдельные дублеты спектральных линий разрешаются хуже. Именно поэтому было важно анализировать весь набор фотоэлектронных спектров, измеренных при разных энергиях фотонов. Спектр $Co 2p_{3/2}$, показанный на рис. 3, *c*, состоит из основной компоненты с энергией связи 778.15 eV и сателлитного пика с высокоэнергетической стороны. И наконец, спектр $Au 4f$ на рис. 3, *d* представляет собой дублет, аналогично спектру на рис. 2, *c*. При этом интенсивность компонент от атомов золота, взаимодействующих с подложкой, существенно превышает сигнал от атомов золота в металлическом состоянии.

По отношению интенсивностей сигнала от взаимодействующих атомов $Au 4f$ и $Si 2p$, можно оценить соотношение атомов золота и кремния как 2:1. Это коррелирует с литературными данными по напылению пленок золота на кремниевую подложку [23–27], в которых сообщается, что при напылении пленок золота толщиной более 2 Å, происходит структурная перестройка границы раздела, которая сопровождается разрывом связей Si–Si, формированием химических связей между атомами Si и Au и образованием области взаимной интердиффузии кремния и золота.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что на границе раздела между графеном и подложкой формируется переходный слой, в котором перемешаны атомы

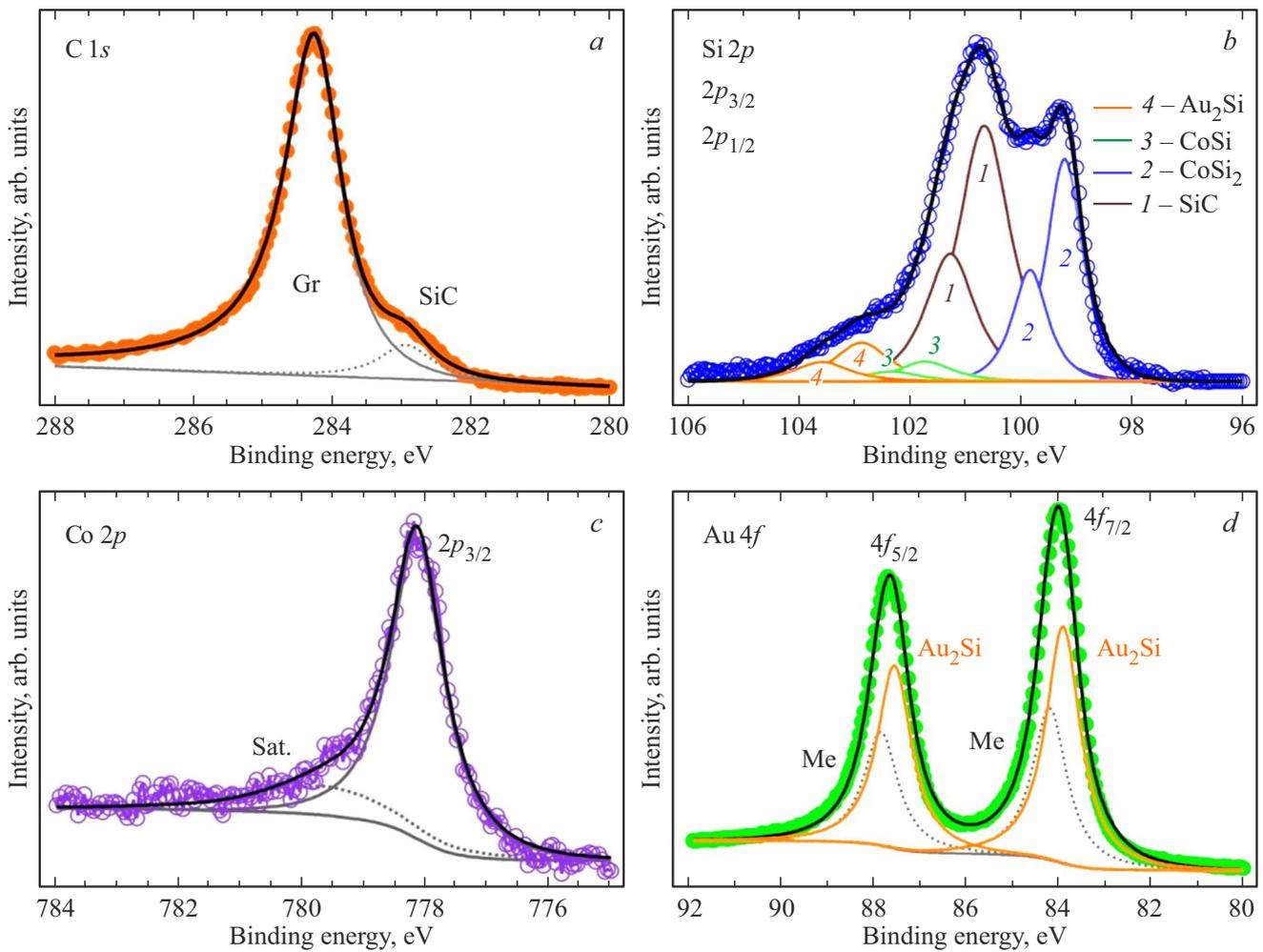


Рис. 3. Фотоэлектронные спектры C 1s, Si 2p, Co 2p_{3/2}, Au 4f, измеренные по нормали к поверхности. Энергия фотонов 980 eV.

золота и кремния и зарождается силицид со стехиометрией Au₂Si.

Фотоэлектронные спектры с использованием энергии фотонов 980 eV были измерены при различных углах вылета фотоэлектронов — по нормали к поверхности (0°) и под углом 60° к нормали. Затем каждый из этих спектров был разложен на спектральные компоненты и определены интенсивности компонент в виде площадей под кривыми. Интенсивность компоненты, измеренной при угле 60°, отнесенная к интенсивности компоненты, измеренной по нормали, дает нам отношение интенсивностей $I(60^\circ)/I(0^\circ)$, представленное в таблице. Данное отношение позволяет анализировать элементный и химический состав образца в зависимости от глубины. Чем меньше отношение $I(60^\circ)/I(0^\circ)$, тем глубже (дальше от поверхности) расположен элемент и соединение, в котором он находится. На основании полученных результатов мы делаем вывод о том, что графен является верхним слоем системы. При этом непосредственно под графеном сформирован силицид золота, близкий по стехиометрии к Au₂Si, еще глубже расположены

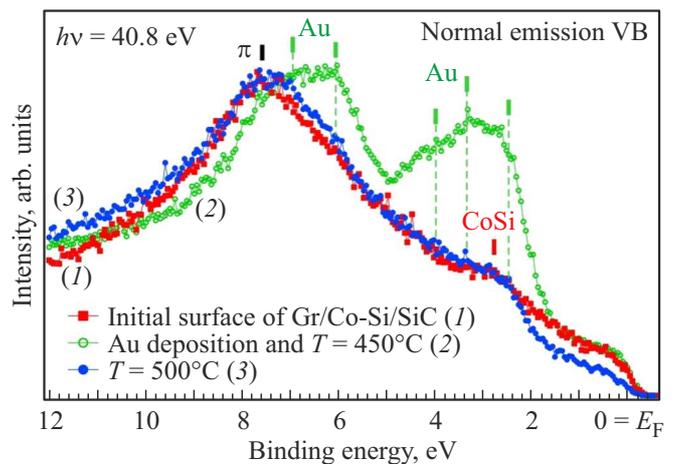


Рис. 4. Фотоэлектронные спектры валентной зоны для исходной поверхности графен/CoSi/CoSi₂/SiC — (1), а также после напыления золота и прогрева системы при $T = 450^\circ\text{C}$ — (2) и $T = 500^\circ\text{C}$ — (3). Спектры измерены по нормали к поверхности и при энергии фотонов 40.8 eV.

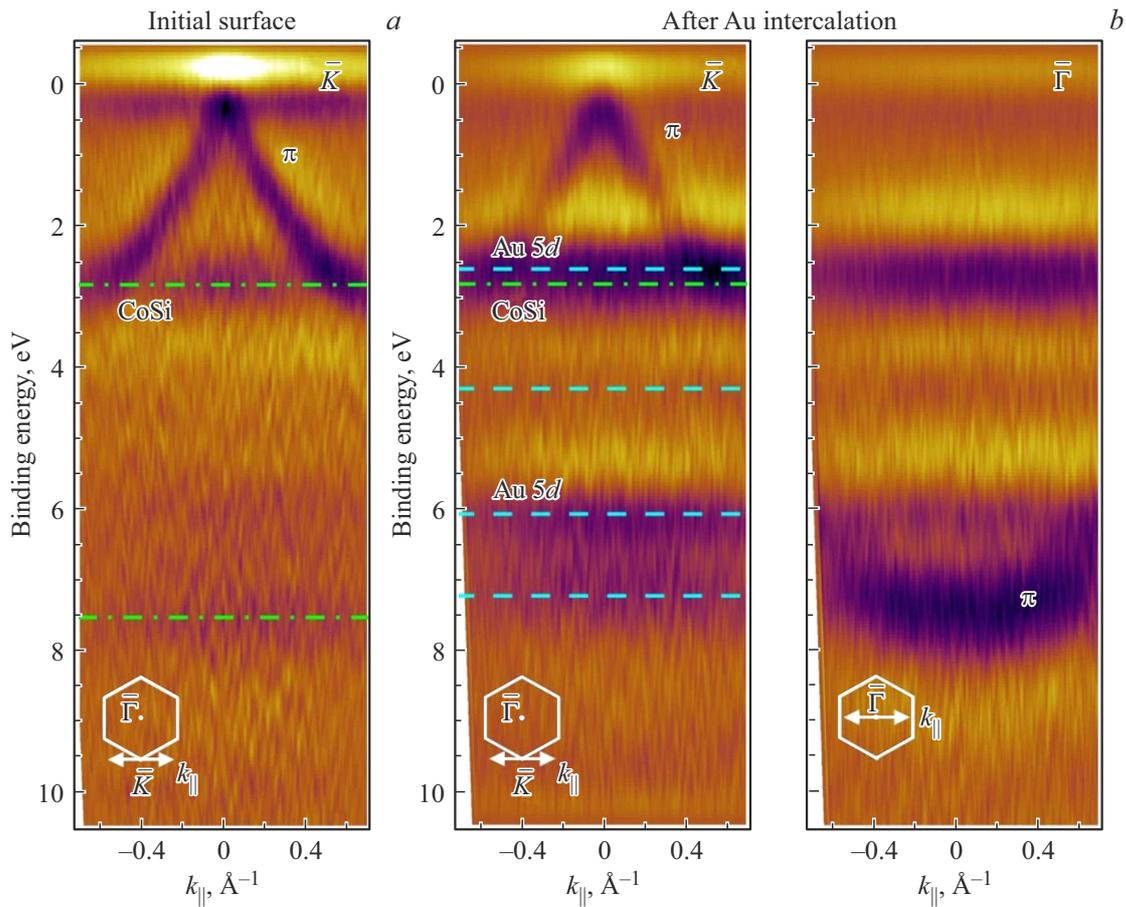


Рис. 5. Дисперсионные зависимости электронных состояний сформированной системы после интеркаляции Au, измеренные в области точек \bar{K} и $\bar{\Gamma}$ зоны Бриллюэна графена. ARPES-карты интенсивности измерены в направлении, перпендикулярном направлению $\bar{K}\bar{\Gamma}$ зоны Бриллюэна, направление измерения схематично показано на рисунках в нижнем левом углу. Энергия фотонов 40.8 eV. Зелеными штрих-пунктирными линиями на рисунке обозначены состояния CoSi, а голубыми пунктирными линиями — 5d-состояния Au.

силициды кобальта CoSi и CoSi₂, и в основании лежит подложка карбида кремния SiC. Полученные данные подтверждают, что в результате синтеза атомы золота интеркалировались под графеновый монослой с формированием переходного слоя, содержащего силицид золота Au₂Si.

Отношение интенсивностей отдельных компонент фотоэлектронных спектров в результате измерения при двух углах эмиссии фотоэлектронов — 0° и 60°

Name of Compound	Reference Peak	Binding energy, eV	$I(60^\circ)/I(0^\circ)$
Graphene	C 1s	284.3	0.23
Au ₂ Si	Au 4f _{7/2}	83.72	0.21
Au ₂ Si	Si 2p _{3/2}	102.87	0.20
CoSi	Si 2p _{3/2}	101.7	0.12
CoSi ₂	Si 2p _{3/2}	99.2	0.096
CoSi ₂	Co 2p _{3/2}	778.15	0.096
SiC bulk	Si 2p _{3/2}	100.65	0.055

Рассмотрим изменения электронной структуры валентной зоны после интеркаляции Au. На рис. 4 показано изменение фотоэлектронных спектров валентной зоны в процессе формирования системы. После напыления золота на поверхность исходной системы графен/CoSi/CoSi₂/SiC и прогреве при $T = 450^\circ\text{C}$ (зеленый спектр (2)) в спектре появляется вклад 5d-орбиталей золота [17], интенсивность π состояний графена при этом сильно уменьшается, а форма спектра вблизи уровня Ферми практически не изменяется.

Дальнейший отжиг системы $T = 500^\circ\text{C}$ (синий спектр (3)) приводит к существенному уменьшению интенсивности сигнала 5d-зоны Au, но остается вклад состояний золота в области энергий связи 2.5–4.5 и 6–7 eV. При этом восстанавливается интенсивность сигнала π состояний графена при энергии 7.6 eV, и изменяется форма спектра вблизи уровня Ферми в области от 0 до 2 eV. В работе [23] было показано, что при напылении тонкой пленки золота на кремниевую подложку спектральная интенсивность вблизи уровня Ферми заметно меньше, чем для металлического золо-

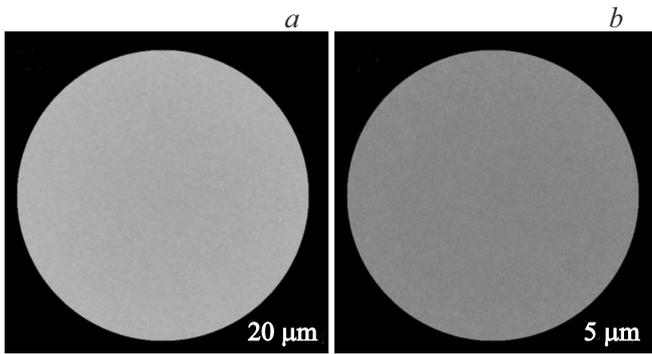


Рис. 6. Изображения РЕЕМ, полученные с использованием ртутной газоразрядной лампы в качестве источника фотонов ($h\nu = 4.9 \text{ eV}$) с областей размером $20 \mu\text{m}$ и $5 \mu\text{m}$ для визуализации однородности поверхности образца на разном масштабе.

та, что объясняется перестройкой валентной зоны при формировании силицида золота. Данные наблюдения свидетельствуют о взаимодействии интеркалированных атомов золота с подложкой в результате прогрева системы до $T = 500^\circ\text{C}$.

Дисперсионные зависимости в области точки \bar{K} поверхностной зоны Бриллюэна для исходной системы графен/CoSi/CoSi₂/SiC показаны на рис. 5 (а). Электронные π состояния графена имеют линейный характер $E(k)$ зависимости и образуют конус Дирака, характерный для графена. Точка Дирака при этом локализована вблизи уровня Ферми.

Кроме состояний графена в электронной структуре обнаруживаются недиспергирующие плоские зоны при 2.8 и 7.5 eV, которые могут быть отнесены к соединению CoSi, согласно теоретическим расчетам объемной плотности состояний [28] и экспериментальным ARPES-данным [29]. Кроме того, расчеты зонной структуры графена на CoSi в работе [14], показали наличие подобной зоны при энергии связи около 2.8 eV.

После интеркаляции Au происходит модификация электронной структуры в окрестности точек \bar{K} и $\bar{\Gamma}$ (рис. 5, b). В области энергий связи от 2.5 до 7.5 eV наблюдается появление $5d$ -состояний золота. Зона CoSi при 2.8 eV при этом остается видимой на спектрах.

Дно π зоны графена расположено при энергии связи 7.5 eV (рис. 5, b), в то время как для графена на SiC(0001) это значение составляет $\sim 8.5 \text{ eV}$ [15], а для графена на Ni(111) или Co(0001) после интеркаляции Au — около 8 eV [8,9,30]. При этом энергия связи C 1s уровня графена в исследуемой системе также меньше, чем в графене на SiC(0001) (284.6 eV [31]), и оказывается близкой к энергии связи C 1s-уровня графена на Ni(111) после интеркаляции Au (284.3 eV [30]). Энергетическое положение C 1s-уровня и положение дна π -зоны графена в точке $\bar{\Gamma}$ коррелируют с энергией взаимодействия графена с подложкой. Согласно [30], чем меньше энергия C 1s-уровня и положение дна

π -зоны, тем меньше энергия взаимодействия графена с подложкой.

Полученные результаты в совокупности с линейным спектром π состояний в области точки \bar{K} свидетельствует о квазисвободном характере графена и слабом взаимодействии графена с никележащей подложкой.

Для визуализации однородности поверхности образца были проведены исследования методом фотоэлектронной микроскопии (РЕЕМ). На рис. 6 показаны РЕЕМ-изображения поверхности сформированной системы в различном масштабе. Контраст на изображениях РЕЕМ отображает изменения работы выхода вдоль поверхности образца. Анализ данных РЕЕМ показал, что поверхность характеризуется одинаковой работой выхода 4.2 eV во всех точках образца, что свидетельствует об однородности поверхности системы. Действительно, если бы интеркаляция золота произошла неравномерно, на поверхности имелись бы участки с различной работой выхода [32]. Таким образом, на микрометровом масштабе мы можем говорить об однородности поверхности синтезированной системы.

4. Заключение

В работе проведено исследование интеркаляции атомов Au под графен, сформированный на слое CoSi/CoSi₂ на подложке SiC(0001). Напыление атомов Au и отжиг системы при температуре $T = 500^\circ\text{C}$ приводит к интеркаляции золота под графен. Данные фотоэлектронной спектроскопии свидетельствуют о взаимодействии интеркалированных атомов Au с подложкой с образованием переходного слоя, в котором перемешаны атомы золота и кремния и зарождается силицид со стехиометрией Au₂Si. При этом π состояния графена сохраняют линейный характер и формируют конус Дирака с вершиной, локализованной вблизи уровня Ферми. Исследования с помощью фотоэлектронной микроскопии показали однородность работы выхода вдоль поверхности образца на микрометровом масштабе. Полученные результаты послужат основой для измерения спиновой электронной структуры и транспортных характеристик синтезированной графен-содержащей системы после интеркаляции Co и Au с целью дальнейшего изучения магнитно-спиновой орбитальной структуры графена.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Д.Е. Марченко за помощь в проведении РЕЕМ измерений.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-72-00031 в части синтеза системы, характеристики методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и исследований методом фотоэлектронной спектроскопии с уг-

ловым разрешением (ARPES). Исследования методом фотоэлектронной микроскопии (PEEM) и анализ фотоэмиссионных данных, полученных с использованием синхротронного излучения, выполнены в рамках гранта Российского научного фонда № 18-12-00062. Авторы выражают благодарность Санкт-Петербургскому государственному университету (проект № 90383050). Д.А. Глазкова благодарит за поддержку международную программу G-RISC.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. Han, R.K. Kawakami, M. Gmitra, J. Fabian. *Nature Nanotechnology* **9**, 794 (2014).
- [2] J.I.-J. Wang, D. Rodan-Legrain, L. Bretheau, D.L. Campbell, B. Kannan, D. Kim, M. Kjaergaard, P. Krantz, G.O. Samach, F. Yan, J.L. Yoder, K. Watanabe, T. Taniguchi, T.P. Orlando, S. Gustavsson, P. Jarillo-Herrero, W.D. Oliver. *Nature Nanotechnology* **14**, 120 (2019).
- [3] A. Avsar, T.-Y. Yang, S. Bae, J. Balakrishnan, F. Volmer, M. Jaiswal, Z. Yi, S. R. Ali, G. Güntherodt, B. H. Hong, B. Beschoten, B. Özyilmaz. *Nano Lett.* **11**, 6, 2363 (2011).
- [4] A.A. Rybkina, A.G. Rybkin, I. Klimovskikh, P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin, A.K. Zvezdin, A.M. Shikin. *Nanotechnology* **31**, 165201 (2020).
- [5] A.M. Shikin, A.A. Rybkina, A.G. Rybkin, I.I. Klimovskikh, P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin, A.K. Zvezdin. *Appl. Phys. Lett.* **105**, 042407 (2014).
- [6] A.A. Rybkina, A.G. Rybkin, V.K. Adamchuk, D. Marchenko, A. Varykhalov, J. Sánchez-Barriga, A.M. Shikin. *Nanotechnology* **24**, 295201 (2013).
- [7] I.I. Klimovskikh, M.M. Otrokov, V.Yu. Voroshnin, D. Sostina, L. Petaccia, G. Di Santo, S. Thakur, E.V. Chulkov, A.M. Shikin. *ACS Nano* **11**, 1, 368 (2017).
- [8] D. Marchenko, A. Varykhalov, M.R. Scholz, G. Bihlmayer, E.I. Rashba, A. Rybkin, A.M. Shikin, O. Rader. *Nature Commun.* **3**, 1232 (2012).
- [9] A.M. Shikin, A.G. Rybkin, D. Marchenko, A.A. Rybkina, M.R. Scholz, O. Rader, A. Varykhalov. *New J. Phys.* **15**, 013016 (2013).
- [10] A.G. Rybkin, A.A. Rybkina, M.M. Otrokov, O.Yu. Vilkov, I.I. Klimovskikh, A.E. Petukhov, M.V. Filianina, V.Yu. Voroshnin, I.P. Rusinov, A. Ernst, A. Arnau, E.V. Chulkov, A.M. Shikin. *Nano Lett.* **18**, 3, 1564 (2018).
- [11] Z. Qiao, S.A. Yang, W. Feng, W.-K. Tse, J. Ding, Y. Yao, J. Wang, Q. Niu. *Phys. Rev. B* **82**, 161414(R) (2010).
- [12] X. Deng, S. Qi, Y. Han, K. Zhang, X. Xu, Z. Qiao. *Phys. Rev. B* **95**, 121410(R) (2017).
- [13] A.A. Rybkina, S.O. Filnov, A.V. Tarasov, D.V. Danilov, M.V. Likholetova, V.Yu. Voroshnin, D.A. Pudikov, D.A. Glazkova, A.V. Eryzhenkov, I.A. Eliseyev, V.Yu. Davyдов, A.M. Shikin, A.G. Rybkin. *Phys. Rev. B* **104**, 155423 (2021).
- [14] С.О. Фильнов, А.А. Рыбкина, А.В. Тарасов, А.В. Ерыженков, И.А. Елисеев, В.Ю. Давыдов, А.М. Шикин, А.Г. Рыбкин. *ЖЭТФ* **161**, 2, 227 (2022).
- [15] K.V. Emtsev, F. Speck, T. Seyller, L. Ley, J.D. Riley. *Phys. Rev. B* **77**, 155303 (2008).
- [16] C. Riedl, C. Coletti, U. Starke. *J. Phys. D* **43**, 374009 (2010).
- [17] A.M. Shikin, G.V. Prudnikova, V.K. Adamchuk, F. Moresco, K.-H. Rieder. *Phys. Rev. B* **62**, 13202 (2000).
- [18] D. Marchenko, A. Varykhalov, J. Sánchez-Barriga, Th. Seyller, O. Rader. *Appl. Phys. Lett.* **108**, 172405 (2016).
- [19] R. Hesse, T. Chassé, R. Szargan. *Fresenius J. Anal. Chem.* **365**, 48 (1999).
- [20] V. Jain, M.C. Biesinger, M.R. Linford. *Appl. Surf. Sci.* **447**, 548 (2018).
- [21] Г.С. Гребенюк, И.А. Елисеев, С.П. Лебедев, Е.Ю. Лобанова, Д.А. Смирнов, В.Ю. Давыдов, А.А. Лебедев, И.И. Пронин. *ФТТ* **62**, 3, 462 (2020).
- [22] Г.С. Гребенюк, Е.Ю. Лобанова, Д.А. Смирнов, И.А. Елисеев, А.В. Зубов, А.Н. Смирнов, С.П. Лебедев, В.Ю. Давыдов, А.А. Лебедев, И.И. Пронин. *ФТТ* **61**, 7, 1374 (2019).
- [23] S.L. Molodtsov, C. Laubschat, G. Kaindl, A.M. Shikin, V.K. Adamchuk. *Phys. Rev. B* **44**, 8850 (1991).
- [24] В.К. Адамчук, И.В. Любинецкий. *ЖТФ* **56**, 9, 1853 (1986).
- [25] И.В. Любинецкий. Оже-спектроскопия межфазовых границ благородный металл-кремний. Дис. канд. физ.-мат. наук. ЛГУ, Л. (1986).
- [26] M. Schmitz, L. Kesper, M.G.H. Schulte, P. Roese, U. Berges, C. Westphal. *J. Phys.: Condens. Matter* **33**, 275001 (2021).
- [27] D.K. Sarkar, S. Bera, S. Dhara, S.V. Narasimhan, S. Chowdhury, K.G.M. Nair. *Solid State Commun.* **105**, 5, 351 (1998).
- [28] Z.J. Pan, L.T. Zhang, J.S. Wu. *J. Appl. Phys.* **101**, 033715 (2007).
- [29] C. Pirri, J.C. Peruchetti, G. Gewinner, D. Bolmont. *Solid State Commun.* **57**, 361 (1986).
- [30] Д.Ю. Усачев. Электронная структура и морфология графена, синтезированного на монокристаллических поверхностях никеля и кобальта. Дис. канд. физ.-мат. наук. СПбГУ, СПб (2010).
- [31] C. Riedl, C. Coletti, T. Iwasaki, A.A. Zakharov, U. Starke. *Phys. Rev. Lett.* **103**, 246804 (2009).
- [32] R. Hönig, P. Roese, K. Shamout, T. Ohkochi, U. Berges, C. Westphal. *Nanotechnology* **30**, 025702 (2019).

Редактор К.В. Емцев