

13,18

## Электронно-стимулированная десорбция атомов цезия с графена на иридии, интеркалированного и не интеркалированного цезием

© Ю.А. Кузнецов, М.Н. Лапушкин, Е.В. Рутьков, Н.Р. Галль

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kuznets@ms.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 18 марта 2019 г.

В окончательной редакции 18 марта 2019 г.

Принята к публикации 19 марта 2019 г.

Исследованы процессы электронно-стимулированной десорбции нейтральных атомов цезия с графена на иридии в случае, когда происходит интеркаляция слоя графена цезием, и в случае, когда она отсутствует. Найдено, что в распределениях по кинетическим энергиям десорбирующихся нейтральных атомов цезия присутствуют два пика: высокоэнергетический при энергии 0.36 eV и низкоэнергетический при энергии 0.13 eV. Высокоэнергетический пик наблюдается в обоих случаях и связан с возбуждением остоного уровня  $2s$  углерода. Низкоэнергетический пик наблюдается только в случае отсутствия интеркаляции и связан с возбуждением остовных уровней  $4f$  и  $5p$  иридия. Предложена модель, описывающая процессы электронно-стимулированной десорбции атомов цезия с поверхности графена на иридии, и сделан вывод, что графен на иридии в этих процессах ведет себя как диэлектрик.

**Ключевые слова:** графен, интеркалирование, цезий, десорбция, иридий, электронные свойства, проводимость.

DOI: 10.21883/FTT.2019.08.47983.425

### 1. Введение

Исследования различных физико-химических процессов, происходящих на поверхности графена, начавшиеся еще в 1970–1980 гг. и проводившиеся многие десятилетия, не потеряли своей актуальности и в настоящее время после обнаружения уникальных электрических свойств графена [1,2]. Свойства графена на иридии, адсорбция на нем атомов щелочных металлов и процессы интеркаляции хорошо изучены к настоящему времени [3–6]. Однако до сих пор свойства графена и адсорбированных на нем металлов практически не изучались методом электронно-стимулированной десорбции (ЭСД).

Облучение электронами поверхности твердого тела с адсорбированными на ней атомами металлов может приводить к их десорбции, если время жизни возбужденного состояния связи адсорбированная частица — поверхность достаточно велико для ее разрыва и удаления частицы от поверхности.

Возбужденное состояние адатома на поверхности металла оказывается очень короткоживущим за счет быстрого ухода возбужденного электрона в зону проводимости подложки, и потому ЭСД нейтральных адатомов металлов на металлах не наблюдается [7]. Слой диэлектрика (или полупроводника) на поверхности металла существенно увеличивает время жизни возбужденного состояния [7–8], и атом имеет конечную вероятность десорбироваться с поверхности. Тогда и наблюдается ЭСД адсорбированных атомов металлов. Следовательно, уже само наблюдение ЭСД адатомов представляет собой

прямое свидетельство неметаллической (диэлектрической или полупроводниковой) природы околосurfaceной области подложки [7–8]. В качестве диэлектрического слоя между адсорбированной пленкой металла и металлической подложкой на практике можно использовать слои кислорода или окислов металлов [9–10], германия [11] и интерметаллидов золота с щелочными металлами [12]. В этих работах регистрировалась ЭСД нейтральных атомов щелочных металлов.

Образование графена на различных металлах, его адсорбционные и интеркаляционные свойства изучены во многих работах [13–19]. В частности, адсорбция щелочных металлов, а также их интеркаляция в системе графен (Gr) на Ir(111) детально исследованы в работах [5–6]. В работе [20] была впервые обнаружена ЭСД атомов Cs с поверхности графена на иридии.

Целью настоящей работы было детальное исследование ЭСД атомов Cs с поверхности графена на иридии в двух случаях: в первом отсутствует интеркаляция графена цезием, и атомы цезия располагаются только на поверхности графена; во втором же графен предварительно интеркалируется атомами цезия, в этом случае атомы цезия располагаются и между слоем графена и металлом. Кроме того, была поставлена задача разработать модель процесса ЭСД в обоих случаях.

### 2. Эксперимент

Измерения были выполнены в сверхвысоковакуумной установке „Спектрометр ЭСД“, давление остаточных

газов в которой не превышало  $5 \cdot 10^{-10}$  Торр. Экспериментальный прибор и методика измерений подробно были описаны ранее [21].

В качестве подложки использовалась текстурированная иридиевая лента размерами  $64 \times 1 \times 0.02$  мм с преимущественным выходом на поверхность грани (111) с работой выхода  $e\phi = 5.75$  эВ [3]. Система графен–иридий хорошо изучена в наших работах [3–5] и является классической при исследовании графена на поверхности металлов [13–15,22]. Это связано с уникальными свойствами иридия: он единственный из металлов не растворяет адсорбированный углерод вплоть до температур  $\sim 2100$  К, а пленки графена на иридии термостабильны до высоких температур  $\sim 1800$  К [3,5].

Графен на Ir(111) формировался стандартным способом — экспозицией нагретого до 1700 К иридия в парах бензола  $C_6H_6$  ( $p_{C_6H_6} \sim 10^{-6}$  Торр): молекулы бензола разваливались на нагретом металле, водород десорбировался, а атомы углерода образовывали островки графена, которые росли по площади, сливались и на конечном этапе объединялись в сплошную пленку графена [4–5]. На графене молекулы бензола не диссоциируют, и процесс роста пленки „автоматически“ ограничивается одним слоем. С помощью сканирующей туннельной микроскопии убедительно показано, что на поверхности сформировался сплошной слой [23]. Графеновая пленка существенно понижает работу выхода поверхности до  $e\phi = 4.45$  эВ и формируется на обеих сторонах иридиевой ленты [4].

Цезий напылялся на мишень из прямонакального испарителя, калибровка потока  $\nu$  производилась по измерению ионного тока  $I_{Cs}^+$ , полученного путем поверхностной ионизации атомов Cs на Ir(111) при  $T > 800$  К. В этом случае имеет место стопроцентная ионизация, что прямо следует из формулы Саха–Ленгмюра в случае, когда работа выхода поверхности больше потенциала ионизации атома [24].

Для решения поставленных задач были выбраны две температуры подложки: одна (низкая)  $T = 160$  К, при которой процесс интеркаляции системы Gr/Ir(111) атомами цезия не происходит и исключены миграционные процессы, и другая (комнатная)  $T = 300$  К, когда вышеуказанные процессы наоборот наблюдаются [6].

Достаточно просто показать, что уменьшение температуры до  $T = 160$  К „замораживает“ миграционные процессы. В работе [5] показано, что при комнатной температуре энергия миграции  $E_M$  атома цезия по графену составляет 0.5 эВ. Тогда легко оценить отношение времен миграции  $\tau_2/\tau_1$  для температур  $T_1 = 300$  К ( $\tau_1$ ) и  $T_2 = 160$  К ( $\tau_2$ ) из следующего выражения [3]:

$$\tau_2/\tau_1 = \exp E_M/kT_2 / \exp E_M/kT_1,$$

где  $k$  — постоянная Больцмана. Подставляя вышеприведенные значения, получим отношение времен миграции  $\tau_2/\tau_1 \approx 10^7$  и время одного миграционного скачка  $\tau_2 \sim 100$  с при  $T_2 = 160$  К, что указывает на пренебрежимо малую миграцию атомов цезия по поверхности

графена и практическую невозможность интеркаляции в системе Gr/Ir за время эксперимента.

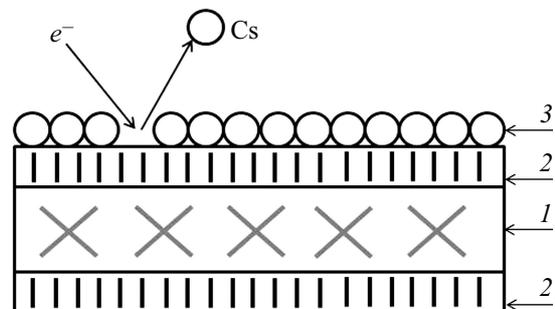
Исследуемые образцы облучались пучком электронов с энергией в диапазоне 0–300 эВ, причем подводимая к ленте мощность электронного пучка составляла не более  $0.1$  мВт/см<sup>2</sup>, что не приводило к изменению температуры за время эксперимента. Десорбирующиеся атомы Cs ионизировались на вольфрамовой ленте и затем регистрировались на коллекторе [21].

### 3. Результаты

#### 3.1. Адсорбция цезия при $T = 160$ К

Известно, что атомы Cs даже при комнатных температурах адсорбируются на графеновой пленке на иридии, накапливаясь как на поверхности, так и под слоем графена примерно в равных концентрациях, близких к монослойной [6,25]. Цезий наносился на графен при низкой температуре 160 К, чтобы минимизировать влияние интеркалированного цезия на процессы ЭСД (рис. 1).

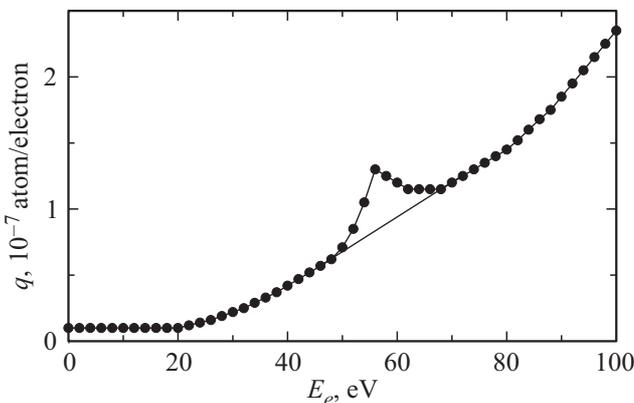
ЭСД атомов характеризуется величиной выхода  $q$ , равной отношению плотности десорбирующегося потока атомов к плотности потока электронов, возбуждающих ЭСД. На рис. 2 представлена зависимость выхода  $q$  атомов Cs при ЭСД из слоя цезия, нанесенного на иридий, покрытый графеном, от энергии электронов  $E_e$  при  $T = 160$  К. В данном опыте концентрация нанесенного цезия составляла  $n_{Cs} = 2.0 \cdot 10^{14}$  атом/см<sup>2</sup>. Видно, что выход  $q$  атомов Cs имеет порог 20 эВ, значение которого не зависит от концентрации нанесенного цезия. При увеличении же энергии облучающих поверхность электронов выход  $q$  возрастает нелинейно. Положение порога близко к энергии связи  $E_B$  уровня  $2s$  углерода с энергией 18 эВ. Объяснение нерезонансной структуры зависимости выхода  $q$  от энергии электронов дано в [26]. Строго говоря, процесс ЭСД имеет резонансную структуру, которая связана с возбуждением электронов с остовных уровней атома и переходом на свободные уровни выше уровня Ферми  $E_F$ . Однако при облучении твердого тела монохроматическим пучком электронов



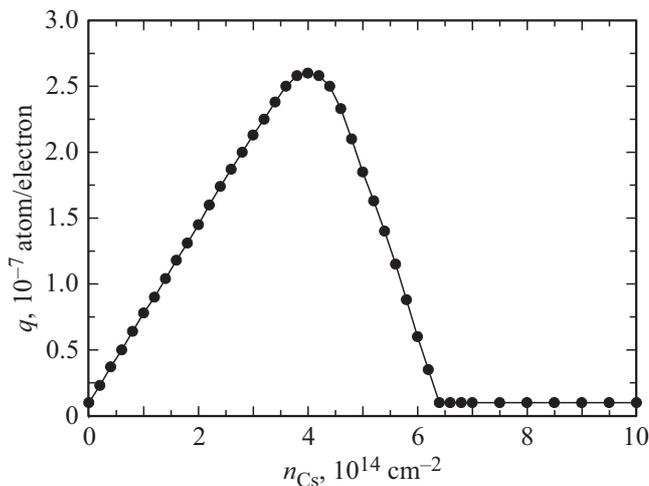
**Рис. 1.** Упрощенная модель графеновой пленки на иридии с адсорбированным цезием при 160 К: 1 — иридиевая подложка, 2 — пленка графена, 3 — атомы цезия на поверхности графена.

происходит потеря электронами части энергии при столкновениях с кристаллической решеткой подложки, что приводит к непрерывному спектру кинетических энергий электронов, возбуждающих процесс ЭСД, и, следовательно, нерезонансной зависимости  $q(E_e)$ . Также отчетливо наблюдается дополнительный пик выхода ЭСД атомов Cs при энергии облучающих электронов 56 eV. Данный пик появляется при концентрации нанесенного цезия  $n_{Cs} \geq 1.2 \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ , а его интенсивность растет с увеличением концентрации нанесенного цезия. Энергетическое положение данного пика приблизительно соответствует энергиям связи уровней иридия  $4f_{5/2}$ ,  $4f_{7/2}$ ,  $5p_{1/2}$ ,  $5p_{3/2}$  — 63.8, 60.8, 63.0 и 48 eV соответственно.

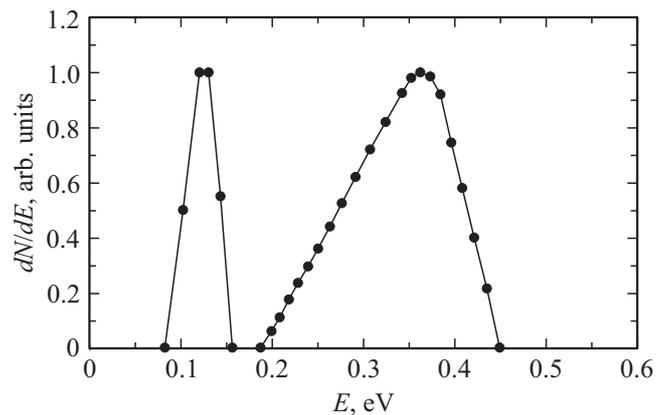
На рис. 3 представлена зависимость выхода атомов Cs при ЭСД из слоя цезия, нанесенного на иридий, покрытый графеном, от концентрации нанесенного цезия.



**Рис. 2.** Выход атомов Cs при ЭСД из слоя цезия, нанесенного на иридий, покрытый графеном, в зависимости от энергии облучающих электронов при температуре 160 К. Концентрация нанесенного цезия  $2.0 \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ .



**Рис. 3.** Выход атомов Cs при ЭСД из слоя цезия, нанесенного на иридий, покрытый графеном, в зависимости от концентрации нанесенного цезия при температуре 160 К для энергии облучающих электронов 80 eV.



**Рис. 4.** Нормированные энергетические распределения атомов Cs при ЭСД с поверхности графена на иридии при температуре поверхности 160 К и энергии электронов 56 eV. Величина концентрации нанесенного цезия  $2.0 \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ .

зия при температуре 160 К для энергии облучающих поверхность электронов 80 eV. Видно, что с ростом концентрации выход растет практически линейно, достигает максимума при концентрации  $4.0 \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ , а затем спадает до уровня шума.

Величину концентрации нанесенного цезия  $4.0 \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$  можно соотнести с монослоем цезия на графене при 160 К [6]. Зависимость  $q(n_{Cs})$  можно объяснить следующим образом: линейный рост выхода ЭСД связан с увеличением покрытия атомами Cs, а его спад определяется двумя факторами. С одной стороны, сказывается влияние глубины проникновения возбуждающих электронов, изменяющейся за счет формирования второго слоя атомов Cs [27]. С другой стороны, адсорбированная монослойная пленка цезия имеет металлический характер, и второй слой строится уже на „металлической“ подложке, а, как известно, на таких подложках ЭСД не наблюдается [7–8].

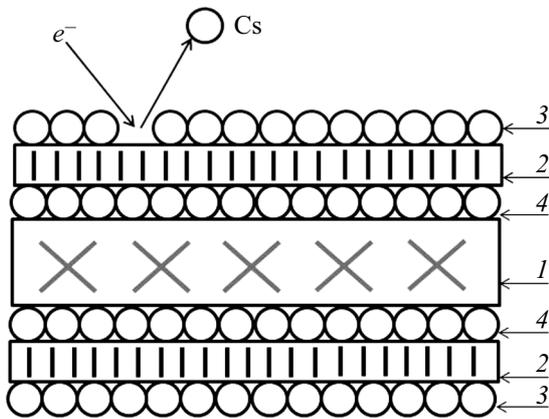
На рис. 4 представлены нормированные распределения по кинетическим энергиям (ЭР) нейтральных атомов Cs десорбирующихся при ЭСД. Видно, что ЭР состоит из двух пиков: высокоэнергетического (ВЭ) при 0.36 eV и низкоэнергетического (НЭ) при 0.13 eV. При малых концентрациях нанесенного цезия (до  $1.2 \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ ) регистрируется только ВЭ пик. НЭ пик появляется в ЭР при концентрациях, больших  $1.2 \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ . С увеличением концентрации нанесенного цезия происходит практически линейный рост выхода в ВЭ и НЭ пиках ЭР. Рост выхода в НЭ и ВЭ пиках ЭР происходит вплоть до концентрации нанесенного цезия  $4.0 \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ .

### 3.2. Адсорбция Cs при $T = 300 \text{ K}$

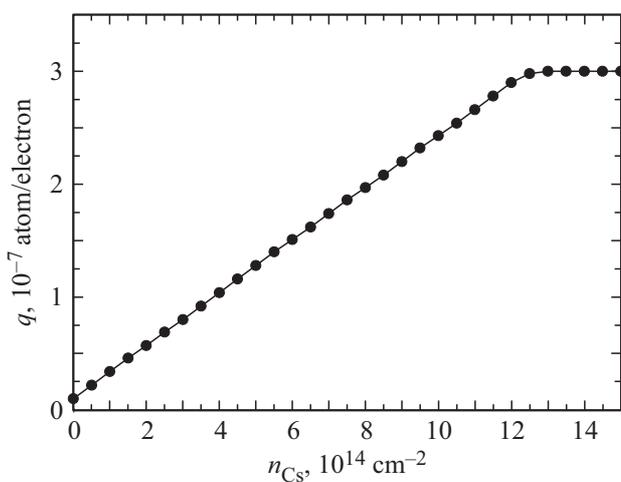
В работе [6] показано, что атомы щелочных металлов (K, Na, Cs) при комнатной температуре легко мигрируют по поверхности графена на обратную, незапыляе-

мую щелочным металлом, сторону ленточного образца. На конечных стадиях напыления атомы цезия накапливаются как на поверхности графена, так и в интеркалированном состоянии под графеновым слоем примерно в равных концентрациях  $\sim (3-4) \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ , что соизмеримо с одним монослоем адсорбата [6]. При этом обе стороны ленты симметричны относительно количества атомов цезия на поверхности (рис. 5). Поэтому на обеих сторонах иридиевой ленты имеется как слой адсорбированных атомов цезия, так и слой атомов под пленкой графена.

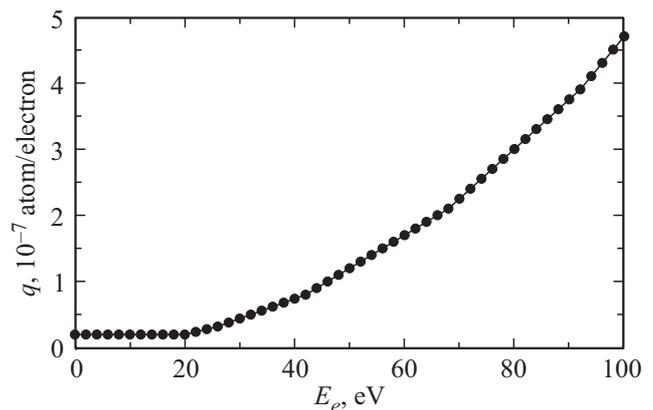
На рис. 6 представлена зависимость выхода  $q$  атомов Cs в случае ЭСД при 300 К от концентрации нанесенного цезия. Видно, что в случае комнатной температуры максимум выхода соответствует дозе нанесенного цезия в четыре раз большей, чем в случае температуры



**Рис. 5.** Упрощенная модель графеновой пленки на иридии с адсорбированным цезием при 300 К: 1 — иридиевая подложка, 2 — пленка графена, 3 — атомы цезия на поверхности графена, 4 — атомы цезия под поверхностью графена.



**Рис. 6.** Выход атомов Cs при ЭСД из слоя цезия, нанесенного на иридий, покрытый графеном, в зависимости от концентрации нанесенного цезия при температуре поверхности 300 К. Энергия облучающих электронов 80 eV.



**Рис. 7.** Выход атомов Cs при ЭСД из слоя цезия, нанесенного на иридий, покрытый графеном, в зависимости от энергии облучающих электронов при температуре поверхности 300 К. Величина концентрации нанесенного цезия  $1.3 \cdot 10^{15} \text{ atom/cm}^2$ .

160 К (рис. 3). Полученные результаты полностью вписываются в физическую картину, описанную выше, и связаны как с интеркалированием, так и с миграционным переходом адатомов Cs на обратную сторону ленточного образца (рис. 5). Общая концентрация атомов  $n_{Cs} = 12.0 \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$  соответствует четырем слоям атомов Cs, на рис. 5.

Также можно отметить отсутствие спада выхода атомов Cs в процессе ЭСД при 300 К, что просто объясняется тем фактом, что при комнатной температуре атомы Cs легко десорбируются с первого слоя цезия и второго слоя цезия не образуется [28].

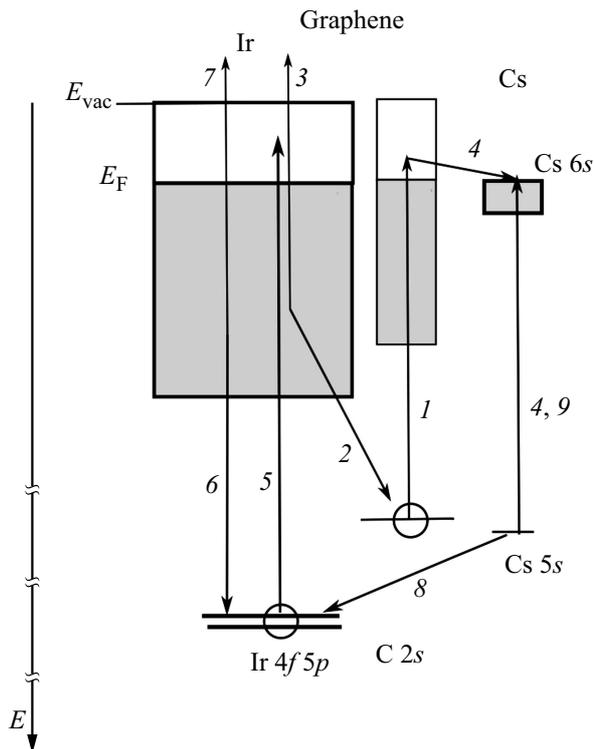
На рис. 7 представлена зависимость выхода  $q$  атомов Cs при ЭСД из слоя цезия, нанесенного на иридий, покрытый графеном, от энергии электронов. В данном опыте концентрация нанесенного цезия составляла  $n_{Cs} = 13.0 \cdot 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ . В этом случае исчезает дополнительный пик выхода, связанный с Оже-процессами при возбуждении остовных уровней иридия, наблюдаемый при 160 К (рис. 2).

При  $T = 300 \text{ K}$  в ЭР наблюдается только один пик с максимумом при  $\sim 0.34 \text{ eV}$ , и его положение практически совпадает с положением максимума ВЭ пика ЭР при  $T = 160 \text{ K}$  ( $\sim 0.36 \text{ eV}$ ).

#### 4. Обсуждение результатов

Сначала рассмотрим процессы, происходящие при адсорбции цезия на Gr/Ir(111) при  $T = 160 \text{ K}$ . Объяснение процессов ЭСД атомов Cs с графена на иридии основано на наших работах [21,27,29–30], а также на полученных в экспериментальных работах и теоретических расчетах данных о графене на иридии [31–33]. Отметим, что графен является бесщелевым полупроводником.

Процессы ЭСД атомов Cs в системе Gr/Ir можно проиллюстрировать схемой, изображенной на рис. 8.



**Рис. 8.** Схема процессов при ЭСД атомов Cs с поверхности иридия, покрытого графеном.

Основной вклад в ЭСД атомов Cs вносит ВЭ пик в ЭР атомов Cs. Электронное облучение образца приводит к возбуждению электрона (1) с основного уровня  $2s$  углерода в зону свободных состояний графена выше уровня Ферми  $E_F$ . Нейтрализация дырки на уровне  $2s$  углерода происходит за счет возможного Оже-процесса: перехода электрона (2) из валентной зоны иридия и выброса электрона из валентной зоны иридия в вакуум (3). На следующем этапе происходит захват электрона (4) в зону незанятых состояний адатомов цезия, что приводит к образованию нейтрального атома Cs с увеличением его размеров и последующему слету атома с поверхности графена.

Более сложная схема переходов получается для НЭ пика в ЭР при ЭСД атомов Cs. Электронное облучение образца приводит к возбуждению электрона (5) из основных уровней иридия  $4f_{5/2}$ ,  $4f_{7/2}$ ,  $5p_{1/2}$ ,  $5p_{3/2}$  в зону незанятых состояний иридия. Тогда может происходить следующий процесс: Оже-нейтрализация дырки на уровнях  $4f_{5/2}$ ,  $4f_{7/2}$ ,  $5p_{1/2}$ ,  $5p_{3/2}$  иридия при переходе электрона (6) из валентной зоны иридия с выбросом электрона из валентной зоны иридия в вакуум (7), что является паразитным процессом.

К образованию же десорбирующегося атома Cs приводит следующий процесс: переход (8) электрона с уровня  $5s$  цезия (с энергией связи  $22.7$  eV) на уровни  $4f_{5/2}$ ,  $4f_{7/2}$ ,  $5p_{1/2}$ ,  $5p_{3/2}$  иридия с одновременным захватом (9) Оже-электрона на валентный уровень соседнего атома

Cs, который получает излишний заряд с увеличением размера атома, что придает ему импульс от поверхности. Атом Cs слетает в виде нейтрального атома, так как его сродство к электрону составляет  $0.47$  eV.

Таким образом, становится ясно, почему НЭ пик ЭР появляется лишь при концентрации нанесенного цезия  $1.2 \cdot 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup>: при меньших концентрациях расстояние между адатомами Cs велико, и Оже-процесс, связанный с двумя соседними адатомами цезия, маловероятен. При концентрациях нанесенного цезия, больших, чем  $1.2 \cdot 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup>, отношение интенсивностей ВЭ и НЭ пиков ЭР не изменяется, что указывает на эффективность вышеуказанного процесса.

Уменьшение выхода ЭСД атомов Cs при концентрациях нанесенного цезия больших, чем  $4.0 \cdot 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup>, связано с невозможностью десорбции атомов во втором слое, который адсорбирован на первом (металлизированном) слое атомов цезия. Поэтому число доступных для процесса ЭСД атомов Cs на графене уменьшается по мере роста второго слоя атомов цезия. Тот факт, что выход ЭСД атомов Cs завершается при покрытии  $\sim 1.8$  монослоя, можно объяснить тем, что расстояние между адатомами цезия во втором слое с ростом покрытия уменьшается, что и приводит к более раннему прекращению процесса ЭСД, чем формирование завершено второго слоя. Однако до сих пор остается неясным квазирезонансный вид НЭ пика в ЭР.

Данная модель также объясняет процессы ЭСД атомов цезия на Gr/Ir(111) и при  $T = 300$  К. Тем не менее, отметим следующие различия: слой цезия между графеном и иридием приводит к тому, что НЭ пик в ЭР атомов Cs отсутствует. Это можно объяснить тем, что переход с уровня  $5s$  цезия на уровни  $4f_{5/2}$ ,  $4f_{7/2}$ ,  $5p_{1/2}$ ,  $5p_{3/2}$  иридия становится маловероятным из-за увеличения расстояния иридий-адсорбированный слой атомов цезия за счет интеркалированного цезия.

Таким образом, эксперименты по ЭСД атомов Cs с графена указывают, что в данных опытах графен на металле ведет себя как диэлектрик. Это согласуется с более ранними наблюдениями того, что в отношении пропускания света графен в интервале толщин 1–10 монослоев тоже ведет себя как диэлектрик, что, видимо, связано с перетеканием заряда между ним и поверхностью металла [34].

## 5. Заключение

Исследованы процессы ЭСД атомов Cs с поверхности графена на иридии при двух температурах: 160 и 300 К. При комнатной температуре наблюдается как адсорбция атомов Cs на поверхность графена, так и интеркаляция атомов Cs под слой графена. При 160 К имеет место только адсорбция, то есть атомы Cs располагаются лишь на поверхности графена.

Показано, что общепринятая модель ЭСД работает и в случае графена на поверхности металла. Основной

вклад в выход ЭСД атомов Cs вносит первоначальное возбуждение остоного уровня  $2s$  углерода в графене, которое проявляется в эксперименте как высокоэнергетический пик с энергией  $0.36\text{ eV}$  в энергораспределении десорбирующихся атомов. Низкоэнергетический пик с энергией  $0.13\text{ eV}$  в этом распределении связан с первоначальным возбуждением остовных уровней  $4f_{5/2}$ ,  $4f_{7/2}$ ,  $5p_{1/2}$ ,  $5p_{3/2}$  иридия. Однако этот пик наблюдается только в отсутствие слоя цезия в интеркалированном состоянии.

Реализация процесса ЭСД возможна лишь в условиях, когда поверхность проявляет диэлектрические свойства, то есть не допускает электронного обмена между уходящими атомами и подложкой, по крайней мере, в интервале времен, характерных для процесса ЭСД, то есть в диапазоне  $10^{-13}$ – $10^{-14}$  с. Видимо, и графен на поверхности металла ведет себя как диэлектрик, по крайней мере, в данных экспериментах.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] А.К. Гейм. УФН **81**, 1284 (2011).
- [2] К.С. Новоселов. УФН **81**, 1299 (2011).
- [3] А.Я. Tontegode. Progr. Surf. Sci. **38**, 201 (1991)
- [4] N.R. Gall, E.V. Rut'kov, A. Ya. Tontegode. Int. J. Mod. Phys. B **11**, 1865 (1997).
- [5] E.V. Rut'kov, N.R. Gall. In: Physics and Applications of Graphene — Experiments / Ed. S. Mikhailov. Intech Open Access Publisher, Rijeka (2011). С. 209.
- [6] E.V. Rut'kov, N.R. Gall. In: Physics and Applications of Graphene — Experiments / Ed. S. Mikhailov. Intech Open Access Publisher, Rijeka (2011). С. 293.
- [7] V.N. Ageev. Progr. Surf. Sci. **47**, 55 (1994).
- [8] T.E. Madey. Surf. Sci. **299/300**, 824 (1994).
- [9] V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, N.D. Potekhina. Surf. Sci. **367**, 113 (1996).
- [10] V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey. Surf. Sci. **390**, 146 (1997).
- [11] V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey. Surf. Sci. **600**, 2163 (2006).
- [12] V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, N.D. Potekhina. J. Phys. Condens. Mater. **22**, 084005 (2010).
- [13] H. Zhang, Q. Fu, Y. Cui, D. Tan, X. Bao. J. Phys. Chem. C. **113**, 8296 (2009).
- [14] R. Larciprete, S. Ulstrup, P. Lacovig, M. Dalmiglio, M. Bianchi, F. Mazzola, L. Hornekaer, F. Orlando, A. Baraldi, P. Hofmann, S. Lizzit. ASC Nano **6**, 9551 (2012).
- [15] E. Granas, J. Knudsen, U.A. Schroder, T. Gerber, C. Busse, M.A. Arman, K. Schulte, J.N. Andersen, T. Michely. ASC Nano **6**, 9951 (2012).
- [16] S. Watcharinyanon, L.I. Johansson, C. Xia, J.I. Flege, A. Meyer, J. Falta, C. Virojanadara. Graphene **2**, 66 (2013).
- [17] А.М. Шикин, М.В. Пойгин, Ю.С. Дедков, С.Л. Молодцов, В.К. Адамчук. ФТТ **42**, 1134 (2000).
- [18] S. Schumacher, D.F. Forster, M. Rosner, T.O. Wehling, T. Michely. Phys. Rev. Lett. **110**, 086111 (2013).
- [19] E.N. Voloshina, Y.S. Dedkov. Z. Naturforsch. A **69**, 297 (2014).
- [20] Ю.А. Кузнецов, Е.В. Рутьков, Н.Р. Галль. Письма в ЖТФ **44**, 103 (2018).
- [21] Ю.А. Кузнецов, М.Н. Лапушкин. Физ.-хим. аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов **7**, 333 (2015).
- [22] E. Starodub, N.C. Bartelt, K.F. McCarty. J. Phys. Chem. C **114**, 5134 (2010).
- [23] Z. Klusek, W. Kozlowski, Z. Waqar, S. Datta, J.S. Burnell-Gray, I.V. Makarenko, N.R. Gall, E.V. Rut'kov, A. Ya. Tontegode, A.N. Titkov. Appl. Surf. Sci. **252**, 1221 (2005).
- [24] Э.Я. Зандберг, Н.И. Ионов. Поверхностная ионизация. Наука, М. (1969). 432 с.
- [25] А.Я. Тонтегоде, Е.В. Рутьков. УФН **163**, 57 (1993).
- [26] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина. ФТТ **49**, 1514 (2007).
- [27] Ю.А. Кузнецов, М.Н. Лапушкин. Письма в ЖТФ **43**, 80 (2017).
- [28] В.Ф. Коваленко. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. Сов. радио, М. (1975). С. 195.
- [29] Ю.А. Кузнецов, М.Н. Лапушкин, Н.Д. Потехина. Письма в ЖТФ **42**, 14 (2016).
- [30] Ю.А. Кузнецов, М.Н. Лапушкин. Физ.-хим. аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов **8**, 207 (2016).
- [31] J. Wintterlin, M.-L. Bocquet. Surf. Sci. **603**, 1841 (2009).
- [32] S. Rusponi, M. Papagno, P. Moras, S. Vlaic, M. Etzkorn, P.M. Sheverdyayeva, D. Pacile, H. Brune, C. Carbone. Phys. Rev. Lett. **105**, 246803 (2010).
- [33] R. Brako, D. Sokcevic, P. Lazic, N. Atodiresci. New J. Phys. **12**, 113016 (2010).
- [34] Е.В. Рутьков, Н.Р. Галль. Письма в ЖЭТФ **100**, 708 (2014).

Редактор Е.Ю. Флегонтова