

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

**Официальный сайт издания в сети Интернет:
www.physchemaspects.ru**

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018
© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 538.971

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННУЮ ДЕСОРБЦИЮ АТОМОВ ЦЕЗИЯ С ГРАФЕНА НА ИРИДИИ

Ю.А. Кузнецов¹, Н.П. Лавровская², Е.В. Рутьков², Н.Р. Галль¹

¹ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

²ФГАОУ ВО «Государственный университет аэрокосмического приборостроения»
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А
kuznets@ms.ioffe.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.383

Аннотация: Обнаружена электронно-стимулированная десорбция атомов Cs с монослойного графена на иридии при температурах поверхности 160 К и 300 К. Показано, что при 160 К миграционные процессы «заморожены», а атомы Cs располагаются только на поверхности графена. При 300 К за счёт интеркаляции образуется дополнительный слой из атомов Cs, расположенных под графеном. Наблюдаемая электронно-стимулированная десорбция атомов Cs связывается с неметаллической природой адсорбированной плёнки графена, независимой от природы атомов металла под графеном: иридия или цезия.

Ключевые слова: электронно-стимулированная десорбция, графен, интеркаляция.

1. Введение

Облучение электронами поверхности твердого тела с адсорбированными атомами металлов может приводить к электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) нейтральных адатомов металлов, если время жизни возбуждённого состояния связи адсорбированная частица–поверхность достаточно велико для разрыва этой связи и удаления частицы от поверхности. Физические основы ЭСД рассмотрены в работах [1-7].

На поверхности металла возбуждённое состояние адсорбированного атома оказывается очень короткоживущим за счёт быстрого ухода возбуждённого электрона в зону проводимости подложки, и поэтому ЭСД нейтральных адатомов металлов на металлах не наблюдается [1]. Слой же диэлектрика (или полупроводника) на поверхности металла существенно увеличивает время жизни возбуждённого состояния [1-2], и возбуждённый атом имеет конечную вероятность десорбироваться с поверхности. В этих условиях ЭСД адсорбированных атомов металлов имеет место. Поэтому уже само наличие ЭСД адатомов металлов в той или иной адсорбционной системе традиционно рассматривается как прямое свидетельство неметаллической природы околоповерхностной области подложки [1-2]. В качестве изолирующей прослойки между металлическим адсорбатом и металлической поверхностью используются адсорбированные слои кислорода [4-5], германия [6] и интерметаллида золота [7]. На таких

поверхностях наблюдается ЭСД атомов *Li* [4], *K* [4,5], *Na* [4], *Cs* [4-7] и *Ba* [4].

В работе [8] в качестве слоя, отделяющего металлическую подложку от адсорбированных атомов, был выбран слой графена на *Ir(111)*. В этой работе, видимо, впервые прямым методом обнаружена электронно-стимулированная десорбция (ЭСД) атомов *Cs* с поверхности графена на металле (иридии). Измерения выполнены времяпролетным методом с помощью детектора на основе поверхностной ионизации.

В работе [8] при изучении ЭСД атомов *Cs* с графена на иридии была выбрана относительно низкая температура подложки $T=160$ К, чтобы «заморозить» миграционные процессы атомов на поверхности и избежать ухода цезия под графеновый «ковёр», т.е. была исключена интеркаляция графенового слоя атомами *Cs*.

В настоящей работе температура подложки соответствовала комнатной $T=300$ К, когда указанные выше процессы весьма активны. В наших работах [9-10] детально изучены процессы интеркалирования графеновых плёнок на металлах (*Ir, Re, Ni, Rh, Mo*) различными атомами (*K, Na, Cs, Ba, C, Ag, Al, Pt*) и молекулами C_{60} . В настоящее время эффект интеркалирования подтверждён многими работами и активно используется для создания тонкого изолирующего диэлектрического слоя между графеном и металлом [11-17].

Измерения выполнены времяпролётным методом при импульсном облучении мишени электронами в сверхвысоковакуумной установке «Спектрометр ЭСД», давление остаточных газов в которой не превышало $5 \cdot 10^{-10}$ Торр. Экспериментальный прибор и методика измерений подробно описаны ранее [18].

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 [19]. Система графен–иридий хорошо изучена в наших работах [19-21] и является традиционной при исследовании графена на поверхности металлов [11-13, 22]. Это связано с уникальными свойствами иридия: он единственный из металлов не растворяет адсорбированный углерод вплоть до температур ~ 2100 К, а плёнки графена на иридии термостабильны до высоких температур ~ 1800 К. Графен на *Ir(111)* формировался стандартным способом – экспозицией нагретого до 1700 К иридия в парах бензола ($p_{C_6H_6} \sim 10^{-6}$ 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 плёнку графена [19-20]. На графене молекулы

бензола не диссоциируют, и процесс роста плёнки «автоматически» ограничивается одним слоем графена. С помощью сканирующей туннельной микроскопии убедительно показано, что на поверхности сформировался сплошной слой графена [23]. Графеновая плёнка существенно понижает работу выхода поверхности до $e\phi = 4,45$ эВ [19].

Цезий напылялся на мишень из прямонакального испарителя путём термического разложения хроматов цезия. Концентрация цезия на поверхности определялась по времени t напыления постоянным потоком. Абсолютная калибровка потока ν атомов Cs производилась по измерению ионного тока I_{Cs}^+ , полученного путём поверхностной ионизации атомов Cs на Ir(111) при $T > 800$ К. В этом случае имели место стопроцентная ионизация атомов и практически полный сбор ионов на коллектор. Как следует из формулы Саха-Ленгмюра, в случае «лёгкой» ионизации, например цезия на Ir(111), $I_{Cs}^+ = e\nu S$, где e – заряд электрона, S – площадь эмитирующей поверхности [24].

Источником электронов в методе ЭСД служила вольфрамовая нить диаметром 0,15 мм, нагретая до 1600 К. Стационарная плотность тока бомбардирующих электронов не превышала 10^{-6} А/см² при ускоряющем напряжении ≤ 100 В и потому не вызывала заметного нагрева мишени. Десорбирующиеся при электронном облучении мишени атомы Cs проходили ряд коллимационных щелей, на которые подавались положительные тормозящие потенциалы, чтобы «отсечь» теоретически возможную ионную составляющую потока десорбирующихся атомов Cs. Нейтральный цезий поступал в специальный технический узел, содержащий нагретую до 1800 К вольфрамовую ленту размерами $70 \times 2 \times 0,01$ мм. На вольфрамовой ленте атомы Cs ионизовались (поверхностная ионизация) и десорбировались в виде ионов Cs^+ – случай «лёгкой» ионизации [24], когда атомы Cs десорбировались в виде ионов Cs^+ , которые регистрировались и анализировались коллекторной системой [18].

ЭСД атомов характеризуется величиной выхода q , равной отношению плотности десорбирующегося потока атомов к плотности потока электронов, возбуждающих ЭСД.

В работе [10] показано, что атомы щелочных металлов (K, Na, Cs) при комнатной температуре легко мигрируют по поверхности графена на обратную, незапыляемую щелочным металлом, сторону ленточного образца. На конечных стадиях напыления атомы Cs накапливаются как на поверхности графена, так и в интеркалированном состоянии под графеновым слоем примерно в равных количествах $\sim (3 \div 4) \times 10^{14}$ см⁻², что соизмеримо с одним монослоем адсорбата [10]. При этом обе стороны

ленты симметричны относительно количества атомов Cs на поверхности (см. рис. 1).

Оценим, как изменяется время τ для одного миграционного скачка для адатомов Cs по графену при уменьшении температуры от $T_1 = 300$ К (τ_1) до $T_2 = 160$ К (τ_2), воспользовавшись известным выражением $\tau = \tau_0 \exp(E_M / kT)$ [21], тогда $\tau_2 / \tau_1 \approx 10^7$, где $E_M = 0,5$ эВ [10].

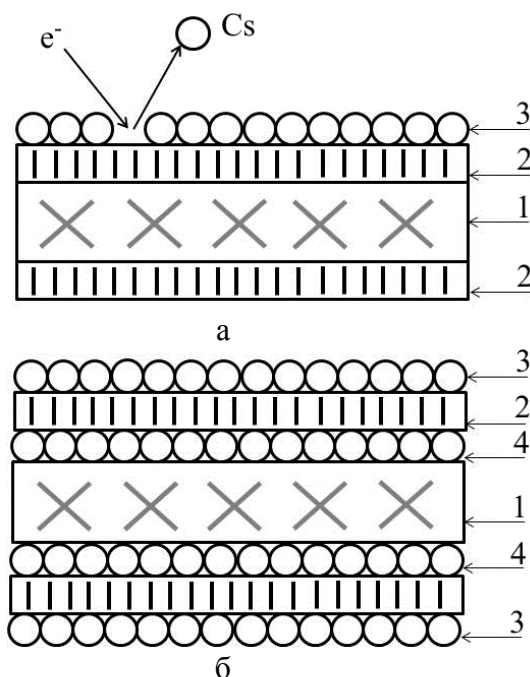


Рис. 1. Упрощённая модель графеновой плёнки на иридии с адсорбированным цезием при а – 160 К, б – 300 К. 1 – иридиевая подложка, 2 – плёнка графена, 3 – атомы цезия на поверхности графена, 4 – атомы цезия под поверхностью графена.

Видно, например, что если при $T_1 = 300$ К для миграционного перехода адатомов Cs на обратную сторону иридиевой ленты шириной 1 мм требуется время ~ 10 с [10], то для $T_2 = 160$ К потребуется уже $\sim 10^8$ с, а для одного миграционного скачка потребуется время $\tau_2 \sim 100$ с. Таким образом, как и предполагалось в работе [8], при 160 К миграционные процессы для адатомов Cs действительно «заморожены».

Рассмотрим процессы ЭСД атомов Cs в случае более сложной подложки, когда атомы цезия напылялись при 300 К до насыщения (см. рис. 1 б). Принципиальным отличием системы от условий в работе [8] является наличие дополнительного слоя из атомов Cs в интеркалированном состоянии (см. рис. 1 б).

На рис. 2 представлены зависимости выхода q атомов Cs при ЭСД из слоя цезия для 160 К (кривая 1) и 300 К (кривая 2) от концентрации нанесённого цезия.

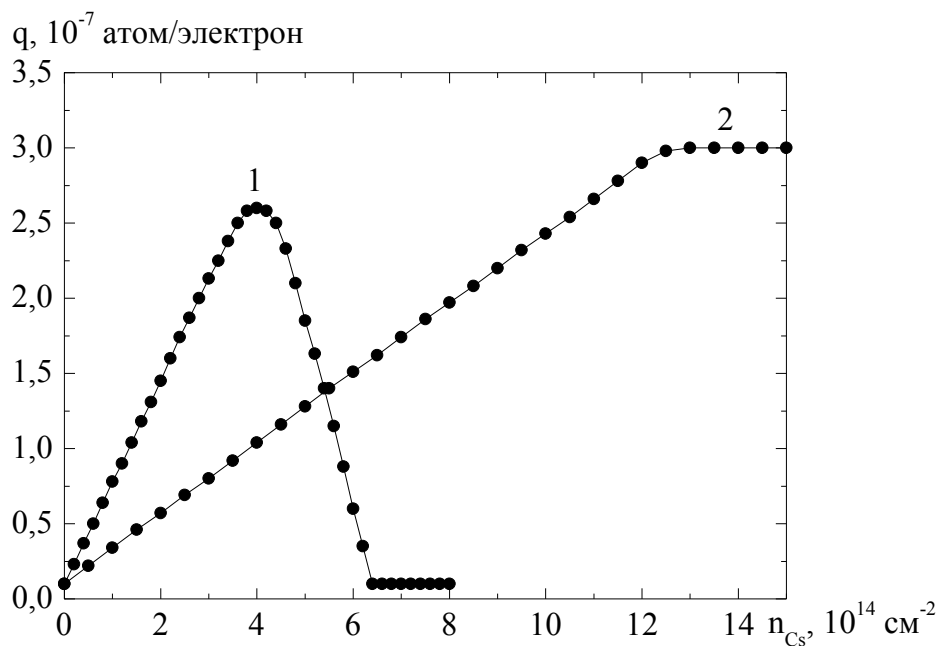


Рис. 2. Выход атомов Cs при ЭСД из слоя цезия, нанесенного на иридий, покрытый графеном, в зависимости от концентрации нанесенного цезия для 1 – 160 К, 2 – 300 К. Энергия облучающих электронов 80 эВ.

Видно, что в случае комнатной температуры максимум выхода соответствует дозе напыленного цезия в четыре раза большей, чем в случае температуры 160 К. Полученные результаты полностью вписываются в физическую картину, описанную выше, и связаны с интеркалированием и миграционным переходом адатомов Cs на обратную сторону ленточного образца (см. рис. 1 б).

Также можно отметить отсутствие спада выхода q атомов Cs при ЭСД при 300 К, что просто объясняется тем фактом, что при комнатной температуре атомы Cs легко десорбируются с первого слоя цезия и толстой пленки цезия не образуется [25].

Кроме того, в случае ЭСД атомов Cs при комнатной температуре исчезает дополнительный пик выхода, связанный с Оже-процессами при возбуждении основных уровней иридия, наблюдаемый при 160 К (см. рис. 3).

Опираясь на работы [1-7], где рассмотрены физические основы метода ЭСД, можно отметить, что основным каналом ЭСД видится образование (под действием электронного облучения поверхности) дырки на основном уровне углерода $2s$ с энергией ~ 18 эВ [26], которая определяет порог появления выхода ЭСД атомов Cs и плавное его увеличение с дальнейшим ростом энергии электронов. Ададом Cs на поверхности графена находится в заряженном состоянии, т. е. в виде иона Cs^+ , поскольку потенциал ионизации цезия 3,89 эВ много меньше работы выхода графена. Дырка на уровне углерода $2s$ заполняется электроном с

более высоко лежащего уровня, вызывая Оже-процесс. Оже-электрон может быть захвачен адсорбированным ионом Cs^+ , нейтрализуя его, и возбужденный атом Cs покидает поверхность. Отметим, что в работе [5], в которой изучалась ЭСД атомов Cs с окисленного молибдена, порог появления выхода ЭСД наблюдался при 24 эВ, что соответствует возбуждению уровня кислорода $2s$ [27].

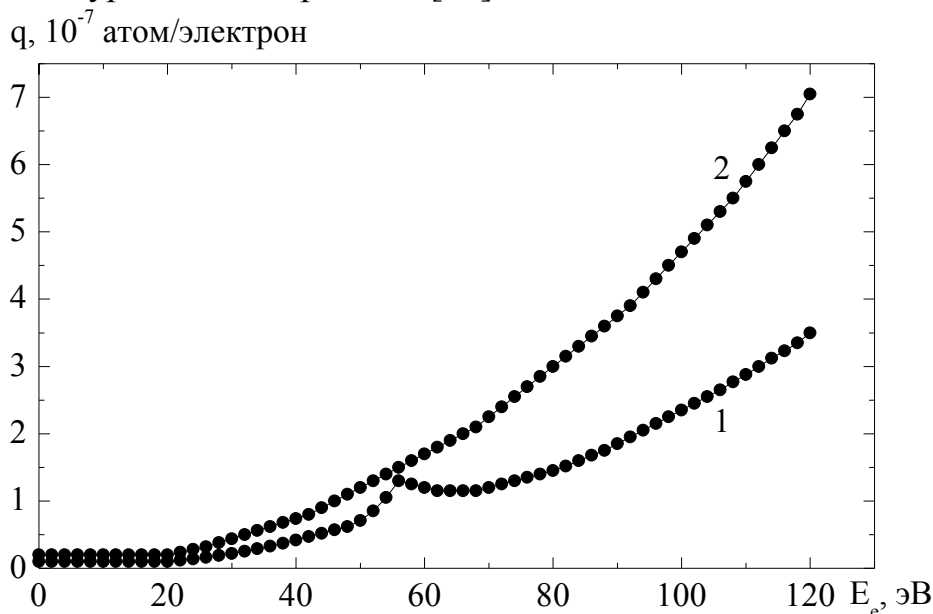


Рис. 3. Выход атомов Cs при ЭСД из слоя цезия, нанесённого на иридий, покрытый графеном, в зависимости от энергии облучающих электронов для 1 – 160 К, 2 – 300 К. Концентрация нанесённого цезия: 1 – $2,0 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$, 2 – $1,3 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$.

Появление дополнительного пика выхода ЭСД атомов Cs можно связать с Оже-процессами возбуждения остовных уровней иридия $5p_3$ и $4f_7$ с энергиями 53 и 62 эВ, соответственно [27]. Аналогичные опыты на других диэлектрических поверхностях, например на окисленном молибдене, показали наличие дополнительных пиков выхода ЭСД атомов Cs с энергиями 40 и 70 эВ [5], что соответствовало возбуждению остовных уровней молибдена $4p$ и $4s$, соответственно [27].

Отсутствие же дополнительного пика выхода на рис. 3 при 300 К разумно связать с экранировкой иридиевой подложки интеркалированным цезием (см. рис. 1 б и рис. 3).

Таким образом, эксперименты с ЭСД атомов Cs с монослойного графена, интеркалированного цезием при 300 К, подтверждают развиваемые в работе [8] представления о диэлектрических свойствах графена независимо от природы атомов, находящихся под слоем графена – атомов иридия или атомов цезия.

Библиографический список:

1. Ageev, V.N. Desorption induced by electronic transitions / V.N. Ageev // Progress in Surface Science. – 1994. – V. 47. – I. 1-2. – P. 55-203.
2. Madey, T.E. History of desorption induced by electronic transitions / T.E. Madey // Surface Science. – 1994. – V. 299-300. – P. 824-836.
3. Menzel, D. Electronically induced surface chemistry: localised bond breaking versus delocalisation / D. Menzel // Surface and Interface Analysis. – 2006. – V. 38. – I. 12-13. – P. 1702-1711.
4. Ageev, V.N. Electron-stimulated desorption of alkali metal and barium atoms from an oxidized tungsten surface / V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, N.D. Potekhina // Surface Science. – 1996. – V. 367. – I. 1. – P. 113-127.
5. Ageev, V.N. Electron-stimulated desorption of potassium and cesium atoms from oxidized molybdenum surfaces / V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey // Surface Science. – 1997. – V. 390. – I. 1-3. – P. 146-151.
6. Ageev, V.N. Electron stimulated desorption of cesium atoms from germanium-covered tungsten / V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey // Surface Science. – 2006. – V. 600. – I. 10. – P. 2163-2170.
7. Ageev, V.N. Electron-stimulated desorption of cesium atoms from cesium layers adsorbed on gold-covered tungsten / V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, N.D. Potekhina // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2010. – V. 22. – I. 8. – P. 084005-1-084005-9.
8. Кузнецов, Ю.А. Электронно-стимулированная десорбция атомов цезия с графена на иридии / Ю.А. Кузнецов, Е.В. Рутьков, Н.Р. Галль // Письма в Журнал технической физики. – 2018. – Т. 44. – Вып. 12. – С. 103-110.
9. Тонтегоде, А.Я. Интеркалирование атомами двумерной графитовой пленки на металлах / А.Я. Тонтегоде, Е.В. Рутьков // Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163. – Вып. 11. – С. 57-74.
10. Rut'kov, E.V. Intercalation of Graphene Films on Metals with Atoms and Molecules / E.V. Rut'kov, N.R. Gall // In: Physics and applications of grapheme – Experiments; ed. by S. Mikhailov. – Rijeka, Croatia: InTech, 2011. – P. 293-326.
11. Zhang, H. Growth mechanism of graphene on $Ru(0001)$ and O_2 adsorption on the graphene/ $Ru(0001)$ surface / H. Zhang, Q. Fu, Y. Cui, D. Tan, X. Bao // Journal of Physical Chemistry C. – 2009. – V. 113. – I. 19. – P. 8296-8301.
12. Granas, E. Oxygen intercalation under graphene on $Ir(111)$: energetics, kinetics, and the role of graphene edges / E. Granas, J. Knudsen, U.A. Schroder, et al. // ASC Nano. – 2012. – V. 6. – I. 11. – P. 9951-9963.
13. Larciprete, R. Oxygen Switching of the Epitaxial Graphene-Metal Interaction / R. Larciprete, S. Ulstrup, P. Lacovig, et al. // ASC Nano. – 2012. – V. 6. – I. 11. – P. 9551-9558.
14. Watcharinyanon, S. Ytterbium intercalation of epitaxial graphene grown on Si -face SiC / S. Watcharinyanon, L.I. Johansson, C. Xia, et al. // Graphene. – 2013. – V. 2. – I. 2. – P. 66-73.
15. Шикин, А.М. Формирование интеркалятоподобных систем на основе монослоев графита и иттербия на поверхности $Ni(111)$ / А.М. Шикин, М.В. Пойгин, Ю.С. Дедков, С.Л. Молодцов, В.К. Адамчук // Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42. – Вып. 6. – С. 1134-1140.

16. **Schumacher, S.** Strain in epitaxial graphene visualized by intercalation / S. Schumacher, D.F. Forster, M. Rosner, T.O. Wehling, T. Michely // *Physical Review Letters*. – 2013. – V. 110. – I. 8. – P. 086111-1-086111-5.
17. **Voloshina, E.N.** Electronic and magnetic properties of the graphene/*Eu*/*Ni*(111) hybrid system / E.N. Voloshina, Y.S. Dedkov // *Zeitschrift fur Naturforschung A*. – 2014. – V. 69. – I. 7. – P. 297-302.
18. **Кузнецов, Ю.А.** Электронно-стимулированная десорбция атомов цезия, адсорбированных на поверхности золота / Ю.А. Кузнецов, М.Н. Лапушкин // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2015. – Вып. 7. – С. 333-340.
19. **Gall, N.R.** Two dimensional graphite films on metals and their intercalation / N.R. Gall, E.V. Rut'kov, A.Ya. Tontegode // *International Journal of Modern Physics B*. – 1997. – V. 11. – I. 16. – P. 1865-1911.
20. **Rut'kov, E.V.** Equilibrium nucleation, growth and thermal stability of graphene on solids / E.V. Rut'kov, N.R. Gall // In: *Physics and applications of grapheme – Experiments*; ed. by S. Mikhailov. – Rijeka, Croatia: InTech, 2011. – P. 209-292.
21. **Tontegode, A.Ya.** Carbon on transition metal surfaces / A.Ya. Tontegode // *Progress in Surface Science*. – 1991. – V. 38. – I. 3. – P. 201-429.
22. **Starodub, E.** Oxidation of graphene on metals / E. Starodub, N.C. Bartelt, K.F. McCarty // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2010. – V. 114. – I. 11. – P. 5134-5140.
23. **Klusek, Z.** Local electronic edge states of graphene layer deposited on *Ir*(111) surface studied by STM/CITS / Z. Klusek, W. Kozlowski, Z. Waqar, et al. // *Applied Surface Science*. – 2005. – V. 252. – I. 5. – P. 1221-1227.
24. **Зандберг, Э.Я.** Поверхностная ионизация / Э.Я. Зандберг, Н.И. Ионов. – М.: Наука, 1969. – 432 с.
25. **Коваленко, В.Ф.** Теплофизические процессы и электровакуумные приборы / В.Ф. Коваленко. – М.: Советское радио, 1975. – С. 195-199.
26. **Xie, Y.** Ultrahigh purity graphite electrode by core level and valence band XPS / Y. Xie, P.M. A. Sherwood // *Surface Science Spectra*. – 1992. – V. 1. – I. 4. – P. 367-372.
27. **Сих, М.П.** Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / М.П. Сих, Д. Бриггс, Дж. К. Ривьер и др.; пер. с англ. под ред. В.И. Раховского, С.И. Реза; под ред. Д. Бриггса, М.П. Сиха. – М.: Мир, 1987. – 600 с.

References:

1. **Ageev, V.N.** Desorption induced by electronic transitions / V.N. Ageev // *Progress in Surface Science*. – 1994. – V. 47. – I. 1-2. – P. 55-203.
2. **Madey, T.E.** History of desorption induced by electronic transitions / T.E. Madey // *Surface Science*. – 1994. – V. 299-300. – P. 824-836.
3. **Menzel, D.** Electronically induced surface chemistry: localised bond breaking versus delocalisation / D. Menzel // *Surface and Interface Analysis*. – 2006. – V. 38. – I. 12-13. – P. 1702-1711.
4. **Ageev, V.N.** Electron-stimulated desorption of alkali metal and barium atoms from an oxidized tungsten surface / V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, N.D. Potekhina // *Surface Science*. – 1996. – V. 367. – I. 1. – P. 113-127.
5. **Ageev, V.N.** Electron-stimulated desorption of potassium and cesium atoms from oxidized molybdenum surfaces / V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey // *Surface Science*. – 1997. – V. 390. – I. 1-3. – P. 146-151.

6. **Ageev, V.N.** Electron stimulated desorption of cesium atoms from germanium-covered tungsten / V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, T.E. Madey // *Surface Science*. – 2006. – V. 600. – I. 10. – P. 2163-2170.
7. **Ageev, V.N.** Electron-stimulated desorption of cesium atoms from cesium layers adsorbed on gold-covered tungsten / V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, N.D. Potekhina // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2010. – V. 22. – I. 8. – P. 084005-1-084005-9.
8. **Kuznecov, Yu.A.** Elektronno-stimulirovannaya desorbciya atomov ceziya s grafena na iridii / Yu.A. Kuznecov, E.V. Rut'kov, N.R. Gall // *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. – 2018. – V. 44. – I. 12. – P. 103-110.
9. **Tontegode, A.Ya.** Interkalirovanie atomami dvumernoj grafitovoj plenki na metallah / A.Ya. Tontegode, E.V. Rut'kov // *Uspekhi fizicheskikh nauk*. – 1993. – V. 163. – I. 11. – P. 57-74.
10. **Rut'kov, E.V.** Intercalation of Graphene Films on Metals with Atoms and Molecules / E.V. Rut'kov, N.R. Gall // In: *Physics and applications of grapheme – Experiments*; ed. by S. Mikhailov. – Rijeka, Croatia: InTech, 2011. – P. 293-326.
11. **Zhang, H.** Growth mechanism of graphene on $Ru(0001)$ and O_2 adsorption on the graphene/ $Ru(0001)$ surface / H. Zhang, Q. Fu, Y. Cui, D. Tan, X. Bao // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2009. – V. 113. – I. 19. – P. 8296-8301.
12. **Granás, E.** Oxygen intercalation under graphene on $Ir(111)$: energetics, kinetics, and the role of graphene edges / E. Granás, J. Knudsen, U.A. Schroder, et al. // *ASC Nano*. – 2012. – V. 6. – I. 11. – P. 9951-9963.
13. **Larciprete, R.** Oxygen Switching of the Epitaxial Graphene-Metal Interaction / R. Larciprete, S. Ulstrup, P. Lacovig, et al. // *ASC Nano*. – 2012. – V. 6. – I. 11. – P. 9551-9558.
14. **Watcharinyanon, S.** Ytterbium intercalation of epitaxial graphene grown on Si -face SiC / S. Watcharinyanon, L.I. Johansson, C. Xia, et al. // *Graphene*. – 2013. – V. 2. – I. 2. – P. 66-73.
15. **Shikin, A.M.** Formirovanie interkalyatopodobnyh sistem na osnove monosloev grafita i itterbiya na poverhnosti $Ni(111)$ / A.M. Shikin, M.V. Pojgin, Yu.S. Dedkov, S.L. Molodcov, V.K. Adamchuk // *Fizika tverdogo tela*. – 2000. – V. 42. – I. 6. – P. 1134-1140.
16. **Schumacher, S.** Strain in epitaxial graphene visualized by intercalation / S. Schumacher, D.F. Forster, M. Rosner, T.O. Wehling, T. Michely // *Physical Review Letters*. – 2013. – V. 110. – I. 8. – P. 086111-1-086111-5.
17. **Voloshina, E.N.** Electronic and magnetic properties of the graphene/ Eu / $Ni(111)$ hybrid system / E.N. Voloshina, Y.S. Dedkov // *Zeitschrift fur Naturforschung A*. – 2014. – V. 69. – I. 7. – P. 297-302.
18. **Kuznecov, Yu.A.** Elektronno-stimulirovannaya desorbciya atomov ceziya, adsorbirovannyh na poverhnosti zolota / Yu.A. Kuznecov, M.N. Lapushkin // *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*. – 2015. – I. 7. – P. 333-340.
19. **Gall, N.R.** Two dimensional graphite films on metals and their intercalation / N.R. Gall, E.V. Rut'kov, A.Ya. Tontegode // *International Journal of Modern Physics B*. – 1997. – V. 11. – I. 16. – P. 1865-1911.
20. **Rut'kov, E.V.** Equilibrium nucleation, growth and thermal stability of graphene on solids / E.V. Rut'kov, N.R. Gall // In: *Physics and applications of grapheme – Experiments*; ed. by S. Mikhailov. – Rijeka, Croatia: InTech, 2011. – P. 209-292.

21. **Tontegode, A.Ya.** Carbon on transition metal surfaces / A.Ya. Tontegode // *Progress in Surface Science*. – 1991. – V. 38. – I. 3. – P. 201-429.
22. **Starodub, E.** Oxidation of graphene on metals / E. Starodub, N.C. Bartelt, K.F. McCarty // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2010. – V. 114. – I. 11. – P. 5134-5140.
23. **Klusek, Z.** Local electronic edge states of graphene layer deposited on *Ir(111)* surface studied by STM/CITS / Z. Klusek, W. Kozłowski, Z. Waqar, et al. // *Applied Surface Science*. – 2005. – V. 252. – I. 5. – P. 1221-1227.
24. **Zandberg, E.Ya.** Poverhnostnaya ionizaciya / E.Ya. Zandberg, N.I. Ionov. – M.: Nauka, 1969. – 432 p.
25. **Kovalenko, V.F.** Teplofizicheskie processy i elektrovakuumnye pribory / V.F. Kovalenko. – M.: Sovetskoe radio, 1975. – P. 195-199.
26. **Xie, Y.** Ultrahigh purity graphite electrode by core level and valence band XPS / Y. Xie, P.M. A. Sherwood // *Surface Science Spectra*. – 1992. – V. 1. – I. 4. – P. 367-372.
27. **Sih, M.P.** Analiz poverhnosti metodami Ozhe- i rentgenovskoj fotoelektronnoj spektroskopii / M.P. Sih, D. Briggs, Dzh. K. Riv'er i dr.; per. s angl. pod red. V.I. Rahovskogo, S.I. Reza; pod red. D. Briggsa, M.P. Siha. – M.: Mir, 1987. – 600 p.

TEMPERATURE EFFECT ON ELECTRON-STIMULATED DESORPTION OF CESIUM ATOMS FROM GRAPHENE ON IRIDIUM

Yu.A. Kuznetsov¹, N.P. Lavrovskaya², E.V. Rut'kov², N.R. Gall¹

¹*Ioffe Institute*

²*State University of Aerospace Instrumentation*

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.383

Abstract: Electron-stimulated desorption of cesium atoms from monolayer graphene on iridium has been observed at 160 K and 300 K. Migration processes have been shown to be frozen at 160 K, and cesium atoms to be located only at the graphene surface. At 300 K, due to intercalation an additional layer of cesium atoms is produced and located under the graphene layer. We believe that observed electron-stimulated desorption of cesium atoms is due to the non-metal nature of the adsorbed graphene film independently on the metal nature under it: iridium or cesium.

Keywords: electron-stimulated desorption, graphene, intercalation.

Кузнецов Юрий Александрович – научный сотрудник, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Лавровская Наталья Павловна – к.ф.-м.н., доцент, ФГАОУ ВО «Государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Рутьков Евгений Викторович – д.ф.-м.н., профессор, ФГАОУ ВО «Государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Галль Николай Ростиславович – д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Yuri A. Kuznetsov – Researcher, Ioffe Institute

Natalya P. Lavrovskaya – Ph. D., Docent, State University of Aerospace Instrumentation

Evgeniy V. Rut'kov – Dr. Sc., Professor, State University of Aerospace Instrumentation

Nicolay R. Gall – Dr. Sc., Professor, Head of Laboratory, Ioffe Institute