

13

Полевая десорбция Na и Cs с графена на иридии

© Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: bernatskii@ms.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 22 февраля 2015 г.

Методом полевой электронной и десорбционной микроскопии изучены особенности полевой десорбции атомов натрия и цезия, адсорбированных на поверхности иридия с графеном. Обнаружено, что адсорбированные атомы натрия сильнее всего понижают работу выхода на графеновых островках, расположенных над плотноупакованными гранями иридия. Воздействие сильного электрического поля качественно одинаково влияет на процессы десорбции натрия и цезия с полевого эмиттера с образованием двух фаз десорбции и не оказывает заметного воздействия на разрушение графенового слоя.

Число работ, посвященных исследованию графена, из года в год растет, что обусловлено перспективами использования супертонкого материала с уникальными свойствами в области нанoeлектроники и вакуумной микроэлектроники [1,2]. В данной работе с помощью методов полевой электронной и десорбционной микроскопии [3] изучены особенности образования графена на поверхности иридиевого полевого эмиттера и процессы адсорбции и десорбции атомов натрия и цезия, обладающих разными потенциалами ионизации и оказывающих существенное влияние на эмиссионные процессы. Применение указанных выше методов исследования позволяет визуально (с помощью электронной и ионной эмиссии с поверхности образца) в нанометровом масштабе наблюдать модификацию поверхности при образовании графена и адсорбции атомов щелочного металла, следить за изменениями работы выхода, измерять локальные токи эмиссии электронов и ионов, определять напряженности соответствующих электрических полей, проводить оценку масс десорбированных с поверхности ионов.

Задачей данной работы явились изучение зависимости образования углеродных покрытий от кристаллографической структуры и кривизны поверхности кристалла иридия, определение мест формирования

графена, устойчивости графеновых покрытий в электрическом поле и особенностей полевой десорбции интеркалированных атомов натрия и цезия.

Для получения образца использовалась иридиевая проволока, которая подвергалась электрохимическому травлению в щелочном растворе с дальнейшим отжигом при $T = 2500$ К в высоком вакууме ($p < 10^9$ Torr). В результате получалось острие с радиусом порядка 500 nm и на экране полевого электронного микроскопа получали характерное электронное изображение поверхности эмиттера, соответствующее кристаллической структуре иридия (рис. 1, *a*). На вершине острия сформировался монокристалл равновесной формы, поверхность которого содержит плоские плотноупакованные грани и переходные ступенчатые области между ними.

Получение графена на поверхности иридия осуществлялось по методике, описанной в [4]. После формирования полевого эмиттера в высоком вакууме производили выдержку эмиттера в парах бензола при давлениях $2 \cdot 10^{-6}$ Torr. Температура эмиттера составляла $T = 1700$ К. Образование графена сопровождалось изменением полевого электронного изображения и понижением работы выхода поверхности эмиттера до величины 4.4 eV. Работа выхода и напряженность электрического поля определялись с использованием характеристик Фаулера–Нордгейма для тока полевой электронной эмиссии.

Полевое электронное изображение иридиевого эмиттера на рис. 1, *a* получено при напряжении на эмиттере 11 kV. Центральное темное пятно соответствует грани (100) иридия. После выдержки эмиттера в парах бензола полевое электронное изображение изменилось (рис. 1, *b*), а напряжение на эмиттере, при котором появлялось изображение, снизилось до значения 8.55 kV. Работа выхода, вычисленная из характеристик Фаулера–Нордгейма, составила 4.4 eV. Как уже упоминалось в наших работах, графен на поверхности полевого эмиттера образуется в основном на плоских низкоиндексных гранях иридия. Это неоднократно проверялось путем интеркалирования графеновых островков атомами цезия и калия [5,6]. Из сравнения рис. 1, *a* и *b* видно, что полевая электронная эмиссия после образования графена идет со ступеней, образованных набором плоскостей (100) иридия, вследствие усиления локального электрического поля.

При напылении монослойного покрытия атомов натрия на поверхность полевого эмиттера происходило снижение работы выхода

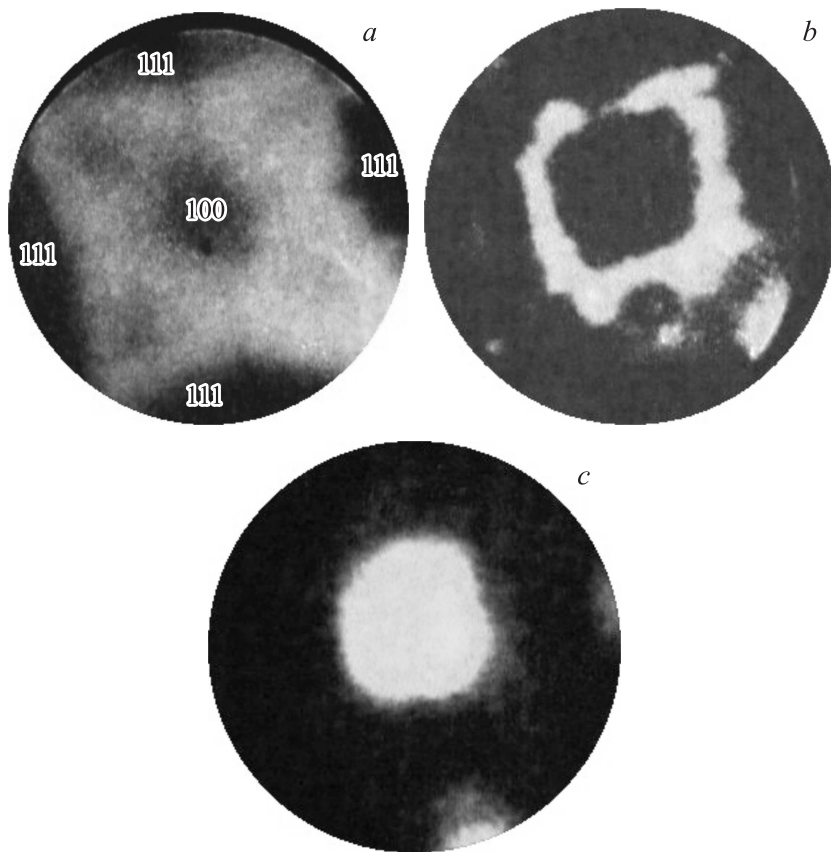


Рис. 1. Полевые электронные изображения эмиттера: *a* — чистый иридий (цифрами обозначены плоские грани), *b* — иридий–углерод (светлые области соответствуют электронной эмиссии с мест локального усиления электрического поля), *c* — иридий–углерод–натрий (электроны эмитируются гранью (100) иридия).

поверхности до значения 2.3 eV. Полевое электронное изображение поверхности эмиттера после напыления натрия приведено на рис. 1, *c* (напряжение на эмиттере 3.1 kV). Из приведенного изображения видно, что полевая электронная эмиссия идет с области островка графена, образовавшегося на грани (100) иридия. Учитывая, что атомы на-

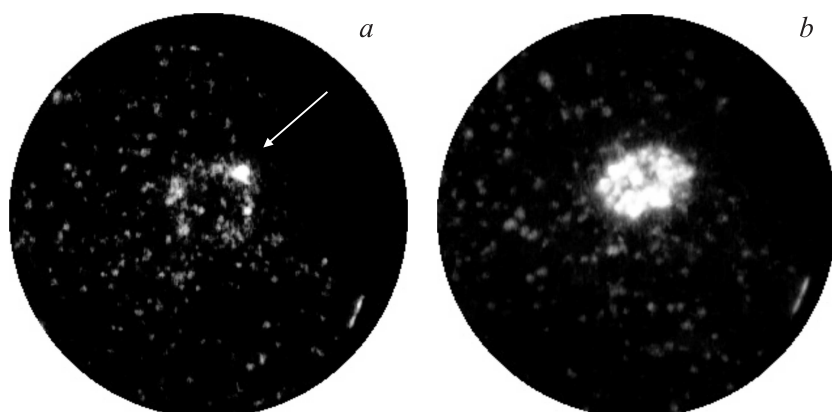


Рис. 2. Полевые десорбционные изображения эмиттера: *a* — начало полевой десорбции интеркалированного натрия через края графенового островка (указано стрелкой) на грани (100), *b* — последующая вспышка интеркалированного натрия с графенового островка.

триа интеркалируют графен при комнатной температуре [4,7], следует предположить, что мы наблюдаем полевую электронную эмиссию с островка графена с атомами натрия не только на его поверхности, но и в интеркалированном состоянии. Это подтверждалось наличием двух фаз полевой десорбции, аналогично десорбции калия и цезия [5]. Поверхностные атомы натрия можно было легко удалить с помощью нагрева до температуры, не превышающей температуру разрушения графеновых островков. При этом интеркалированные атомы натрия оставались под слоем графена и наблюдалась одна высокополевая фаза десорбции. Полевое электронное изображение, полученное после удаления адсорбированных на поверхности атомов натрия, практически совпадает с изображением, приведенным на рис. 1, *b*, т.е. с изображением, полученным после образования графена. Также нет и заметного изменения эмиссионных характеристик, что говорит об отсутствии или очень слабом влиянии интеркалированного натрия на величину работы выхода поверхности. Аналогичные результаты были получены на данном эмиттере и при напылении атомов цезия с более низким потенциалом ионизации по сравнению с натрием.

Стадии полевой десорбции натрия появляются по мере увеличения десорбирующего напряжения на эмиттере. На рис. 2 приведены полевые

десорбционные изображения эмиттера, соответствующие различным стадиям десорбции. При постепенном увеличении напряжения на эмиттере полевая десорбция натрия начинается в виде эмиссии отдельных ионов натрия с участков поверхности, на которых имеется локальное усиление поля. Далее в этот процесс включается вся поверхность и происходит вспышка десорбции поверхностного натрия при напряжении на эмиттере 6.5 kV (первая низкополевая фаза десорбции). При дальнейшем повышении напряжения на эмиттере возникают лавинообразные вспышки интеркалированного натрия с граней (100) и (111) иридия. На рис. 2, *a, b* приведена лавинообразная вспышка (вторая высокополевая фаза) на грани (100) иридия при напряжении 18 kV. На рис. 2, *a* запечатлен момент начала полевой десорбции отдельных ионов интеркалированного натрия через края графенового островка, расположенного над гранью (100) иридия. На рис. 2, *b* запечатлен момент последующей вспышки ионов, образовавшихся при полевой десорбции атомов натрия, вышедших из-под графенового слоя на его поверхность. Важно отметить, что в процессе полевой десорбции не происходит разрушения графеновых островков. После полного освобождения эмиттера с графеновым покрытием от атомов натрия и многократного напыления новых порций натрия повторяется описанный процесс полевой десорбции в форме двух фаз. Если удалить атомы натрия, расположенные на поверхности эмиттера с помощью нагрева до $T = 1000$ K, то наблюдается только высокополевая фаза десорбции, т.е. десорбция только интеркалированного натрия. При сравнении полевой десорбции атомов натрия и атомов цезия на одном и том же полевом эмиттере можно было заметить, что напряженность электрического поля для полевой десорбции интеркалированного цезия ($3.5 \cdot 10^{-7}$ V/cm) ниже, чем для интеркалированного натрия ($7 \cdot 10^7$ V/cm). Для полевой десорбции адсорбированных на поверхности металла атомов щелочных металлов это было бы очевидным результатом, принимая во внимание, что потенциал ионизации атома цезия 3.89 eV, а атома натрия 5.14 eV. Но в данном случае атомы щелочного металла экранированы от непосредственного воздействия электрического поля слоем графена. Поэтому влияние свойств атомов на напряженность электрического поля, приводящего к их выходу (освобождению) из-под графена и десорбции, требует дополнительного объяснения.

Таким образом, в результате исследований изучена полевая десорбция атомов натрия и цезия с иридиевого полевого эмиттера с углеродным покрытием, полученным в результате пиролиза бензола на

его поверхности. Из полученных полевых десорбционных изображений поверхности эмиттера были определены места, на которых наблюдаются 2 фазы десорбции атомов щелочного металла: низкополевая — десорбция с поверхности эмиттера в более слабом электрическом поле и высокополевая — десорбция из интеркалированного состояния из-под островков графена. Показано влияние свойств атомов щелочных металлов (потенциала ионизации) на величину электрического поля, десорбирующего интеркалированные графеном атомы щелочного металла. Стабильность графеновых островков сохраняется при электрических полях с напряженностью 10^8 V/cm.

Список литературы

- [1] Geim A.K., Novoselov K.S. // Nature Materials. 2007. N 6. P. 183–191.
- [2] Kumar S., Duesberg G.S., Pratap R., Raghavan S. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 103107 (1–5).
- [3] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. // Известия РАН. Сер. Физ. 2009. Т. 73. № 5. С. 713–715.
- [4] Gall N.R., Rut'kov E.V., Tontegode A.Ya. // Int. J. Mod. Phys. B. 1997. V. 11. P. 1865–1911.
- [5] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 23. С. 104–110.
- [6] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 6. С. 33–37.
- [7] Рутьков Е.В., Галль Н.Р. // ФТТ. 2015. Т. 57. В. 6. С. 1225–1228.