

Эффект инверсии полевой электронной эмиссии с вольфрама, покрытого наноструктурированным углеродом, при адсорбции атомов цезия

© Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов

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

Поступило в Редакцию 6 марта 2010 г.

Обнаружена инверсия полевой электронной эмиссии с пленки аморфного углерода, содержащей нанокластеры графита, при адсорбции на ее поверхности атомов цезия. Инверсия состоит в пропадании эмиссии с нанокластеров графита, бывших до нанесения цезия локальными источниками эмиссии, и в появлении однородной эмиссии с прежде не эмитировавшей поверхности аморфного углерода. Дается объяснение обнаруженного эффекта на основе процессов поверхностной диффузии атомов цезия в неоднородном электрическом поле, интеркалирования цезием нанокластеров графита и связанного с этими процессами „переворачивания“ дипольного момента при изменении направления электрического поля.

В настоящее время представляют интерес работы, направленные на поиск эффективных эмиттеров с большой плотностью тока, работающих при пониженных напряжениях и при температурах, превышающих рабочие температуры полупроводников [1]. Уже давно ведутся исследования полевых эмиттеров для вакуумной микроэлектроники, обладающих необходимыми параметрами. В последнее время достаточно широко представлены исследования различных материалов для полевых эмиттеров, в той или иной степени содержащие наноструктурированный углерод в разных модификациях [2].

В данной работе были проведены исследования полевой электронной эмиссии с пленки наноструктурированного углерода на вольфраме и выяснение влияния на ее эмиссионные свойства атомов щелочного металла, адсорбированных на поверхности пленки.

Для изучения эмиссионных свойств поверхности в нанометровом масштабе были использованы метод полевой электронной микроскопии и метод полевой десорбционной микроскопии непрерывного режима с широкоугольным атомным зондом [3], позволяющие визуализировать эмитирующие области и их трансформацию. Изображения регистрировались детектором из двух последовательных пластин диаметром 56 mm и люминесцентного экрана. В качестве образца использовалось вольфрамовое острие с радиусом вершины порядка 300–500 nm. Для нанесения цезия использовался атомарный поток цезия из прямоканальных испарителей, в которых находились соли цезия и восстановитель. После адсорбции цезия в режиме широкоугольного атомного зонда снимались времяпролетные масс-спектры для определения масс частиц, десорбирующихся в электрическом поле. Давление остаточных газов в камере было не хуже 10^{-9} Торр.

Пленка наноструктурированного углерода толщиной ~ 50 nm наносилась на поверхность образца с помощью реактивного магнетронного распыления графитовой мишени [4]. Ранее с помощью полевой десорбционной микроскопии непрерывного режима было показано, что структура углеродной пленки, полученной методом магнетронного распыления, представляет собой диэлектрическую матрицу, в которой могут быть расположены нанокластеры графита размерами 10–50 nm [5]. При подаче отрицательного напряжения на образец полевая электронная эмиссия начинается с этих областей при напряжении $U = 2.8$ kV, что отчетливо проявляется в появлении светлых областей на полевых электронных изображениях (рис. 1, *a*, $U = 3.3$ kV).

После напыления моноатомного слоя цезия на поверхность углеродной пленки при температуре $T = 300$ K полевое электронное изображение поверхности существенно изменялось. Светлые области становились темными на фоне примерно однородной полевой эмиссии с остальной поверхности полевого эмиттера при напряжении $U = 3.1$ kV (рис. 1, *b*). На приведенном изображении видны темные области, соответствующие расположению нанокластеров графита в пленке аморфного углерода. Изменение приложенного к острию напряжения (в пределах $U = 3–5$ kV) не приводит к заметному изменению наблюдаемого полевого электронного изображения (ток полевой электронной эмиссии составлял 0.1–5 nA). Полевая электронная эмиссия с нанокластеров графита практически отсутствует, а полевая электронная эмиссия с оставшейся области имеет примерно однородный характер.

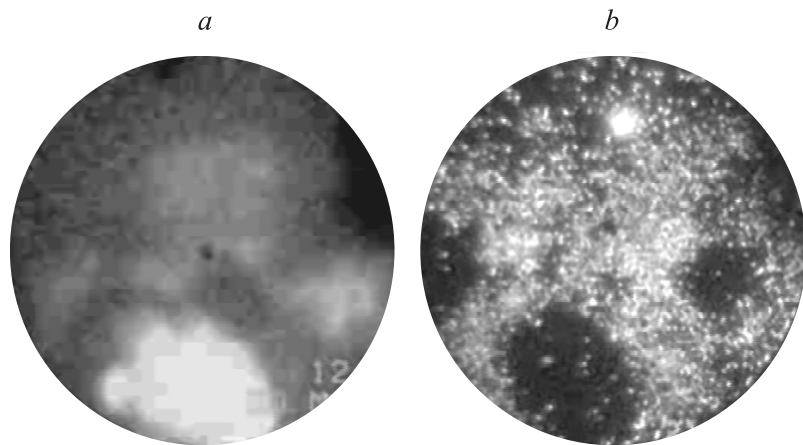


Рис. 1. Полевые электронные изображения пленки аморфного углерода с нанокластерами графита: *a* — до нанесения цезия, *b* — с адсорбированным цезием.

В результате напыления монослоя цезия произошла инверсия электронной эмиссии. С нанокластеров графита, являвшихся центрами (источниками) полевой электронной эмиссии в пленке аморфного углерода до напыления цезия, полевая электронная эмиссия стала существенно меньше по сравнению с эмиссией из диэлектрического слоя аморфного углерода. При небольшом нагреве образца до ~ 400 К в течение 2 h можно было наблюдать с помощью метода полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия трансформацию наноструктур, в частности, разрастание и слияние графитовых нанокластеров (до прогрева — рис. 2, *a*, $U = 10.3$ kV; после прогрева — рис. 2, *b*, $U = 10.9$ kV). Инверсия электронной эмиссии при напылении цезия сохраняется (рис. 2, *c*, $U = 4.2$ kV).

Для объяснения обнаруженного эффекта следует учесть тот факт, что графитовые нанокластеры, содержащиеся в пленке аморфного гидрогенизированного углерода, представляют собой проводящие структуры и их присутствие в диэлектрической матрице приводит к увеличению локальной напряженности электрического поля вблизи нанокластера. При напылении атомов цезия на пленку аморфного гидрогенизированного углерода наряду с адсорбцией может происходить интеркалирование графитовых включений атомами цезия. Учитывая

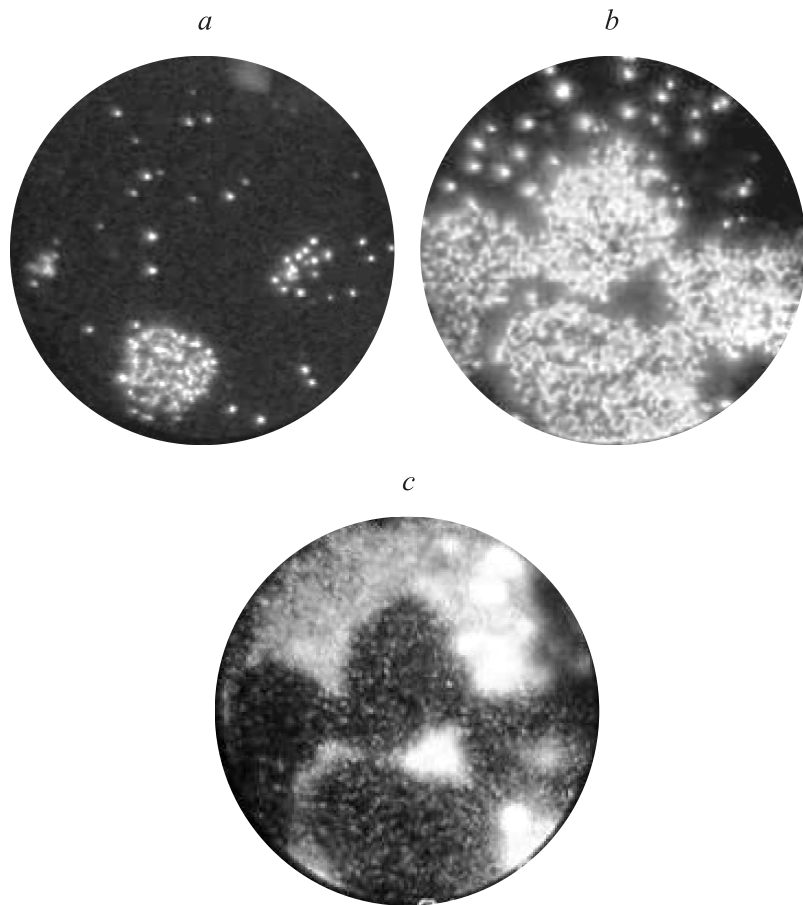


Рис. 2. Полевые десорбционные изображения: *a* — до прогрева, *b* — после прогрева 400 К, 2 h; *c* — полевое электронное изображение.

вышесказанное, можно предложить модель, которая основана на поверхностной диффузии атомов щелочного металла в неоднородном электрическом поле, интеркалировании графита атомами цезия и образовании двойного электрического слоя, параметры которого зависят от полярности внешнего электрического поля. При адсорбции на металлах атомы цезия на поверхности имеют положительный заряд, величина

которого зависит от степени покрытия (концентрации). Образованный этими атомами дипольный момент имеет такое направление, которое уменьшает работу выхода и облегчает тем самым выход электронов из металла. На полевом электронном изображении это проявляется в резком увеличении яркости эмитирующих областей [6,7]. В случае графитовых нанокластеров, расположенных в диэлектрической матрице, электрическое поле в зависимости от полярности действует на адсорбированные атомы цезия по-разному. В положительном поле (плюс на образце) адатомы цезия диффундируют по поверхности в область более сильного поля [8], собираясь на поверхности нанокластеров. При отрицательном поле, когда наблюдается полевое электронное изображение, адатомы цезия диффундируют в обратном направлении, с поверхности нанокластеров графита на поверхность диэлектрической пленки аморфного углерода. Концентрация адатомов цезия на поверхности нанокластеров становится меньше, чем на поверхности аморфного углерода. В приповерхностной области графитовых нанокластеров находится интеркалированный цезий, т. е. цезий, находящийся в объеме, который создает противоположно направленный дипольный момент, увеличивающий работу выхода для электронов, что и приводит к инверсии полевого электронного изображения. На полевом электронном изображении в местах расположения нанокластеров графита появляются темные области (рис. 1, *b* и 2, *c*).

Таким образом, обнаружена инверсия полевой электронной эмиссии с пленки аморфного углерода, содержащего нанокластеры графита, при адсорбции атомов цезия, что свидетельствует об образовании областей, у которых направление дипольного момента определяется направлением внешнего электрического поля. Это важно не только для объяснения эмиссионных свойств подобных систем, но может представлять определенный интерес для катализа [9].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-08-00870-а).

Список литературы

- [1] *Fursey G.N.* // Applied Surface Science. 2003. V. 215. P. 113.
- [2] *Forbes R.G.* // Solid-State Electronics. 2001. V. 45. P. 779.
- [3] *Бернацкий Д.П., Павлов В.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. С. 713.

- [4] *Аверьянов В.Л., Звонарева Т.К., Чернышев А.В. и др. // ФТТ. 1991. Т. 33. С. 3410.*
- [5] *Bernatskii D.P., Chernyshev A.V., Ivanov-Omskii V.I. // Applied Surface Science. 2003. V. 215. P. 222.*
- [6] *Бернацкий Д.П., Власов Ю.А., Павлов В.Г. // ЖТФ. 1987. Т. 57. С. 2257.*
- [7] *Ageev V.N., Bernatskii D.P., Kuznetsov Yu.A., Pavlov V.G., Potekhina N.D., Yakshinskii B.V. // Phys. Low-Dim. Struct. 1994. V. 7. P. 51.*
- [8] *Гаврилок Б.М., Наумовец А.Г. // ФТТ. 1963. Т. 5. В. 10. С. 2792.*
- [9] *Кнатъко М.В., Лапушкин М.Н., Палеев В.И. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 74. С. 99.*