Министерство образования и науки
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 9

ТВЕРЬ 2017

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 об 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, 2017. – Вып. 9. – 592 с.

ISBN 978-5-7609-1275-6

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 978-5-7609-1275-6

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2017

© Тверской государственной
университет, 2017

УДК 538.971

ПОЛЕВАЯ ДЕСОРБЦИЯ АТОМОВ ЦЕЗИЯ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕНИЯ

Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов

ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

bernatskii@ms.ioffe.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.089

Аннотация: С помощью метода полевой десорбционной микроскопии исследована десорбция атомов цезия с квазисферической поверхности микрокристалла рения. Получена зависимость напряженности десорбирующего электрического поля от степени покрытия эмиттера цезием. В рамках модели сил зеркального изображения для полевой десорбции произведена оценка теплоты адсорбции атомов цезия в зависимости от поверхностной концентрации цезия и работы выхода поверхности.

Ключевые слова: полевая десорбционная микроскопия, ионные источники, полевой эмиттер, рений, щелочные металлы.

Изучение явления полевой десорбции имеет научное и практическое значение, так как ионные источники, которые работают на этом принципе, представляют большой интерес для применения в современных ионнолучевых технологиях для нанoeлектроники [1, 2].

В данной работе исследована десорбция атомов цезия (в виде ионов) в электрическом поле с поверхности рениевого полевого эмиттера с радиусом вершины порядка 500 нм при температуре эмиттера $T = 300$ К. Напряженность электрического поля необходимая для десорбции зависит от многих факторов, в частности, от потенциала ионизации, теплоты адсорбции атомов адсорбата, работы выхода поверхности, материала эмиттера. Визуализация процесса десорбции с поверхности дает распределение ионного тока по поверхности эмиттера и позволяет определять области эмиссии, что имеет значение для фокусировки ионного пучка. Для проведения исследований использовался полевой десорбционный микроскоп с широкоугольным атомным зондом [3], позволяющий измерять параметры десорбции, визуализировать изображение поверхности в десорбируемых ионах в нанометровом масштабе, а также проводить оценку масс десорбирующихся ионов. В используемом полевом десорбционном микроскопе применена система регистрации, состоящая из шевронной сборки двух микроканальных пластин диаметром 56 мм и люминесцентного экрана, которые отстоят от полевого эмиттера на расстоянии порядка 10 см. Прикладывание к эмиттеру импульсов напряжения длительностью 2–10 нс и амплитудой 2–5 кВ одновременно с постоянным напряжением (до 30 кВ) делает возможным измерять время пролета ионов от эмиттера до регистрирующей системы, записывать времяпролетные масс-спектры и

осуществлять оценку масс десорбирующихся ионов.

Полевой эмиттер для исследований изготавливался из рениевой проволоки путем электрохимического травления в кислотном растворе. Затем в камере полевого эмиссионного микроскопа производили отжиг эмиттера в высоком вакууме ($P < 10^{-9}$ Торр) при температуре $T = 2500$ К. Во время отжига происходила очистка рения и формирование кристаллической структуры эмиттера в виде острия с радиусом вершины порядка 500 нм. Процессы очистки и формирование острия формы отжига контролировались по полевым электронным изображениям поверхности. После формирования полевого эмиттера наблюдалось стандартное полевое электронное изображение сферической поверхности кристалла рения с центральной гранью $(11\bar{2}0)$ [4]. Работа выхода поверхности эмиттера и напряженность электрического поля измерялись с использованием вольтамперных характеристик (характеристик Фаулера-Нордгейма) полевой электронной эмиссии.

Поверхность вершины эмиттера, сформированная с помощью отжига, представляет близкую к полусфере поверхность монокристалла равновесной формы с расположенными на ней плоскими низкоиндексными гранями. В неоднородном электрическом поле можно создать условия для диффузии атомов цезия (щелочных металлов) по поверхности полевого эмиттера от периферии к центру. Атомы цезия в процессе миграции по поверхности эмиттера десорбируются приложенным электрическим полем с мест, где выполняются условия для полевой десорбции. Десорбирующиеся ионы создают на экране полевого эмиссионного микроскопа десорбционные изображения поверхности, по которым можно изучать влияние различных факторов на процессы десорбции и подбирать оптимальные режимы работы источника.

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости работы выхода поверхности эмиттера ϕ (график а) и напряженности десорбирующего электрического поля F (график б) от степени покрытия эмиттера цезием. За степень покрытия равную $\theta = 1$ принято оптимальное покрытие θ_{opt} , при котором наблюдается минимальное значение работы выхода поверхности эмиттера.

В области покрытий эмиттера цезием θ от 0 до 1 полевая десорбция (после напыления атомов цезия) имела лавинообразный характер и атомы цезия десорбировались со всей вершины эмиттера, что регистрировалось по полевым электронным и полевым десорбционным изображениям поверхности эмиттера.

При $\theta > 1$ полевая десорбция имела сложный характер. При достижении порогового значения поля происходила частичная десорбция

атомов цезия, степень покрытия уменьшалась и десорбция прекращалась. При дальнейшем увеличении напряженности поля происходила десорбция одиночных атомов цезия, покрытие эмиттера цезием постепенно уменьшалось и когда оно достигало значения θ_{opt} , наблюдалась лавинообразная десорбция всего оставшегося цезия.

Рис. 1. Зависимости работы выхода поверхности эмиттера (а) и напряженности десорбирующего электрического поля (б) от степени покрытия эмиттера цезием.

Для описания процессов полевой десорбции атомов щелочных металлов, обладающих малыми потенциалами ионизации, была принята модель сил зеркального изображения [5]. Согласно этой модели максимальная потенциальная энергия иона в электрическом поле понижается в соответствии с эффектом Шоттки. Энергия активации для полевой десорбции однократно заряженного иона может быть представлена в виде выражения

$$Q = Q_0 - e^{3/2} F^{1/2}, \quad (1)$$

где Q_0 – энергия десорбции иона в отсутствие электрического поля, e – заряд электрона, F – напряженность приложенного электрического поля. Энергия десорбции иона Q_0 в отсутствие электрического поля связана с энергией десорбции нейтрального атома Λ выражением:

$$Q_0 = \Lambda(\theta) + I - \phi(\theta), \quad (2)$$

где I – потенциал ионизации атома, ϕ – работа выхода поверхности.

С использованием этой модели для полевой десорбции из полученных экспериментальных данных была произведена оценка энергии десорбции атома цезия и энергии десорбции иона с поверхности рениевого эмиттера, результаты которых приведены на рис. 2. При оценке теплоты

десорбции энергия активации десорбции в десорбирующем электрическом поле при температуре $T = 300$ К принималась равной нулю.

Рис. 2. Зависимости энергии десорбции атома Λ (кривая 1) и иона Q_0 (кривая 2) цезия от степени покрытия поверхности рения цезием.

С ростом покрытия поверхности эмиттера атомами цезия энергия десорбции иона Q_0 увеличивается. Это можно объяснить тем, что работа выхода поверхности уменьшается быстрее, чем энергия десорбции нейтрального атома Λ . Тогда в области покрытий $\theta < \theta_{opt}$ при десорбции атомов цезия с уменьшением степени покрытия происходит уменьшение энергии десорбции иона Q_0 . Скорость полевой десорбции для термически активируемого процесса при этом увеличивается. Это приводит к лавинообразной десорбции, что и наблюдается в эксперименте в форме вспышки эмиссии ионов цезия. После вспышки остается фронт десорбции, окружающий вершину острия. Эмиссия ионов с фронта и с поверхности острия за фронтом (с внешней по отношению к вершине острия) продолжается непрерывно. При изменении приложенного напряжения фронт сдвигается: при понижении напряжения — к вершине острия, при повышении — от вершины. Похожие зависимости наблюдались при полевой десорбции щелочных металлов с вольфрама и иридия [6, 7].

Фронт десорбции обусловлен диффузией адатомов цезия по поверхности эмиттера в неоднородном электрическом поле с боковой поверхности на вершину [8]. Локальное местоположение фронта десорбции определяется приложенным электрическим напряжением и локальным усилением электрического поля, т.е. там, где на поверхности достигается пороговое для десорбции значение напряжённости поля. В области от фронта до периферии эмиттера поверхность покрыта цезием,

напряженность электрического поля меньше порогового для этого покрытия и десорбция отсутствует, а после фронта (в центре эмиттера) цезия нет – атомы цезия уже десорбировались при вспышке.

Рис. 3. Полевое десорбционное изображение, регистрирующее непрерывную эмиссию ионов цезия с граней типа (1110).

При определенных условиях эмиссия ионов цезия шла только с плоских граней рения типа (1110) (см. рис. 3). При этом вследствие поверхностной диффузии атомов цезия в неоднородном электрическом поле десорбция носила непрерывный характер. Такой характер эмиссии может быть полезен для получения узких потоков ионов в ионных источниках, предназначенных для ионно-лучевых технологий.

Библиографический список:

1. Nanofabrication using focused ion and electron. Principles and applications / ed. I. Utke, S. Moshkalev, Ph. Russell. – New York: Oxford University Press, 2012. – 813 p.
2. **Avasthi, D.K.** Swift heavy ions for materials engineering and nanostructuring / D.K. Avasthi, G.K. Mehta // Springer Series in Materials Science. – 2011. – V. 145. – 280 p.
3. **Бернацкий, Д.П.** Исследование поверхности твердого тела методом полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия / Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – Т. 73. – № 5. – С. 713-715.
4. **Beach, Th.** / Adsorption studies of aluminum oxide on rhenium by means of field emission microscopy / Th. Beach, R. Vanselow // Applied physics. – 1974. – V. 4. – I. 3. – P. 265-270.
5. **Muller, E.W.** Field ion microscopy, field ionization and field evaporation / E.W. Muller, T.T. Tsong // Progress in Surface Science. – Oxford: Pergamon Press, 1973. – V. 4. – 139 p.
6. **Bernatskii, D.P.** Field desorption of sodium / D.P. Bernatskii, V.G. Pavlov // Physics of Low-Dimensional Structures. – 1997. – V. 7. – P. 93-98.
7. **Бернацкий, Д.П.** Полевая эмиссионная микроскопия поверхности полевого эмиттера на основе *Ir–C–Cs* / Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов // Письма в журнал технической физики. – 2013. – Т. 39. – Вып. 23. – С. 9-13.
8. **Гаврилюк, В.М.** Поверхностная диффузия адсорбированных атомов в электрическом поле / В.М. Гаврилюк, А.Г. Наумовец // Физика твердого тела. – 1963. – Т. 5. – № 10. – С. 2792-2798.