

12.1;13.2

## Полевой электронный эмиттер в форме иридиевого острия с углеродным покрытием

© Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup> E-mail: vpavlov@ms.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 10 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 10 апреля 2019 г.

Принято к публикации 12 апреля 2019 г.

Изучаются свойства полевого электронного эмиттера, поверхность которого получена разложением молекул бензола на иридиевом острие. В результате на вершине острия образуется кристалл графита. Показана устойчивость к адсорбции молекул остаточных газов, а также возможность локализации эмиссии с помощью адсорбции и интеркаляции атомов щелочного металла.

**Ключевые слова:** полевые эмиттеры, электронная эмиссия, углерод, иридий, бензол.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.13.47952.17832

Полевые острийные (точечные) эмиттеры электронов обладают уникальными свойствами для получения и фокусировки пучков с большой плотностью тока [1]. Локализованные в малом телесном угле потоки электронов с большой плотностью тока, получаемые из полевых эмиттеров, создают хорошие перспективы для использования их в электронной микроскопии, рентгеновском микроанализе и других видах электронно-лучевых методик и технологий. Применение полевых электронных эмиттеров в электронной микроскопии радикально улучшило характеристики приборов [2].

Наибольшее распространение получили электронные эмиттеры в форме острия из тугоплавкого металла, чаще всего из вольфрама. Такие эмиттеры достаточно просты в изготовлении, их легко очистить от объемных и поверхностных загрязнений высокотемпературным прогревом в вакууме. Металлические острийные эмиттеры позволяют получать узкие электронные пучки с рекордно большой плотностью тока [1] и обладают рядом других достоинств.

Основным недостатком металлических эмиттеров является их нестабильная работа в недостаточно хороших вакуумных условиях. Адсорбция молекул остаточных газов приводит к изменению работы выхода поверхности эмиттера. Электронная эмиссия сопровождается образованием ионов, которые бомбардируют поверхность эмиттера, что приводит к изменению рельефа поверхности и соответственно к изменению локальной напряженности электрического поля. С учетом сильной (экспоненциальной) зависимости плотности тока полевой электронной эмиссии от поля и работы выхода такие изменения вызывают значительные отклонения эмиссионного тока и могут привести к гибели эмиттера.

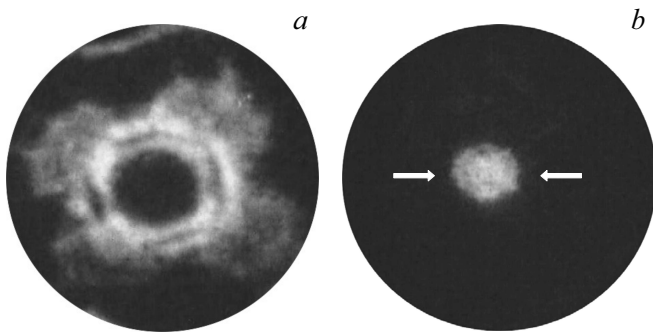
Большей устойчивостью к перечисленным факторам нестабильности работы обладают эмиттеры из различных углеродных материалов [3,4]. В отличие от металлов изготовление острия из углерода (графит, алмаз) представляется трудной задачей. Поэтому во многих

работах изучается полевая электронная эмиссия эмиттеров, состоящих из проводящей подложки (металл, полупроводник) и нанесенных на нее различных углеродных образований. В том числе имеются работы, в которых углеродные покрытия предназначены для защиты поверхности металлического острия [5].

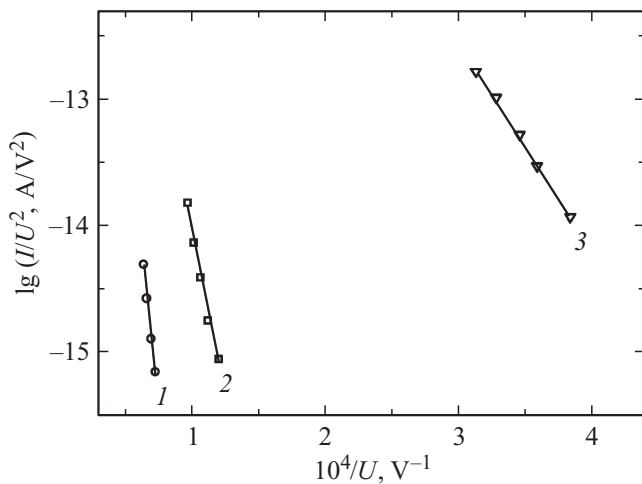
В настоящей работе изучаются возможности изготовления комбинированного металл-углеродного полевого электронного эмиттера с помощью разложения органических молекул на поверхности металлического острия. В качестве материала острия выбран иридий, который практически не образует соединений и твердых растворов с углеродом, а в качестве органического вещества — бензол.

Исследования проводились в вакуумной металлической установке полевого эмиссионного микроскопа с помощью методик полевой электронной микроскопии, измерения характеристик полевой электронной эмиссии и полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия [6]. Изменения работы выхода поверхности вычислялись из вольт-амперных характеристик Фаулера–Нордгейма для токов полевой электронной эмиссии. Распределение электронов в пучке определялось исходя из полевых электронных изображений с помощью компьютерной программы ImageJ. Эмитируемые образцом электроны и ионы, а также формируемые ими эмиссионные изображения регистрировались детектором, состоящим из двух микроканальных пластин диаметром 56 mm и люминесцентного экрана. Давление остаточных газов не превышало  $10^{-9}$  Torr, пары бензола напускались в камеру через игольчатый натекагель.

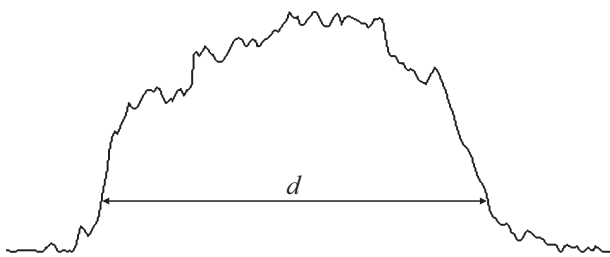
Острия изготавливались из иридиевой проволоки путем электрохимического травления в щелочном растворе. Полученные острия отжигались в вакууме при температуре  $T = 2500$  K, в результате чего на вершине острия формировался монокристалл с радиусом закругления порядка 500–1000 nm. Получение углеродных покрытий осуществлялось посредством выдержки



**Рис. 1.** Полевые электронные изображения: *a* — иридиевого эмиттера с монокристаллом графита на вершине, *b* — после напыления цезия и последующего прогрева.



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики Фаулера–Нордгейма, соответствующие чистому иридию (1), случаю, показанному на рис. 1, *a* (2) и рис. 1, *b* (3).



**Рис. 3.** Распределение электронов в пучке в сечении, обозначенном стрелками на рис. 1, *b*.

нагретого острья ( $T = 1200\text{--}1900\text{ К}$ ) в парах бензола при давлении  $10^{-8}\text{--}10^{-5}\text{ Torr}$  [7].

Структура получаемого углеродного покрытия зависела от экспозиции эмиттера в парах бензола. При малых экспозициях образовывалась пленка графена на плотноупакованных гранях вершины острья и отдельные атомы или их скопления на скругленных участках [8]. При больших экспозициях на вершине острья вырос кристалл монокристалл графита. На рис. 1, *a* приведено его

полевое электронное изображение, а на рис. 2 представлены характеристики Фаулера–Нордгейма чистого иридиевого острья (кривая 1) и выросшего на нем кристалла графита (кривая 2). Эмиссионное изображение и эмиссионные характеристики такого эмиттера (иридиевое острье, покрытое графитом) были устойчивыми к адсорбции остаточных газов. Они не изменялись после выдержки эмиттера в течение нескольких суток в вакуумной камере без откачки (давление возрастало до  $10^{-3}\text{ Torr}$ ). В течение месяца на одном и том же покрытом графитом эмиттере проводились эксперименты с напылением щелочных металлов. Прогрев эмиттера для удаления напыленных адсорбатов возвращал его к исходному состоянию (рис. 1, *a* и кривая 2 на рис. 2).

Напыление щелочных металлов на покрытый графитом иридий приводило к понижению рабочих напряжений на эмиттере, а в определенных случаях — к локализации эмиссии на небольшой площади поверхности эмиттера. На рис. 1, *b* приведен пример полевого электронного изображения, а на рис. 2 (кривая 3) — характеристика Фаулера–Нордгейма, соответствующая рис. 1, *b*. Эти состояния эмиттера были получены в результате напыления атомов цезия на поверхность графитового покрытия и последующего прогрева при температуре  $T = 500\text{ К}$ . При таком прогреве часть атомов цезия десорбировалась с поверхности, а часть перешла в интеркалированное состояние внутри графита. Как видно (рис. 1, *b*), эмиссия электронов идет только с области поверхности над гранью (001) исходного иридиевого острья. Форма пятна эмиссии зависела от исходного состояния графитового покрытия. В одних случаях получалось квадратное пятно, а в других (при других экспозициях в парах бензола) форма пятна была близка к кругу (рис. 1, *b*).

Эмиссия из небольших областей на поверхности эмиттера представляет определенную ценность для электронно-лучевых приложений. В случае полевой электронной эмиссии расходящийся пучок эквивалентен пучку, исходящему из практически точечного источника. Образующийся пучок электронов легко фокусировать. На рис. 3 приведен график относительного распределения электронов по углу вылета в сечении пучка, обозначенном стрелками на рис. 1, *b*. Диаметр зоны эмиссии составлял  $d \approx 10\text{ nm}$ .

Таким образом, показана возможность получения полевого электронного эмиттера, устойчивого к адсорбции остаточных газов, с помощью выдержки нагретого иридиевого острья в парах бензола. Изучена локализация полевой электронной эмиссии в узком телесном угле с использованием адсорбции щелочных металлов на углеродном покрытии.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0040-2014-0021.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] *Фурсей Г.Н.* Автоэлектронная эмиссия. СПб.: Лань, 2012. 320 с.
- [2] *Edgcombe C.J., Valdre U.* Field emission and electron microscopy // *Microscopy and microanalysis*. Cambridge University Press, 2000. V. 6. P. 380–387.
- [3] *Шешин Е.П.* Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд-во МФТИ, 2001. 288 с.
- [4] *Forbes R.G.* // *Solid-State Electron*. 2001. V. 45. P. 779–808.
- [5] *Соминский Г.Г., Тумарева Т.А., Тарадаев Е.П., Рукавицына А.А., Гиваргизов М.Е., Степанова А.Н.* // *ЖТФ*. 2019. Т. 89. В. 2. С. 302–305.
- [6] *Бернацкий Д.П., Павлов В.Г.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2009. Т. 73. № 5. С. 713–715.
- [7] *Рутьков Е.В., Галль Н.Р.* Физика поверхности твердых тел. Графен и графит на поверхности твердых тел. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 58.
- [8] *Бернацкий Д.П., Павлов В.Г.* // *ФТТ*. 2016. Т. 58. В. 1. С. 196–199.