

05;10;11;12

## **Многоэмиттерный полевой источник ионов на основе наноструктурированных углеродных материалов**

© О.А. Великодная, В.А. Гурин, И.В. Гурин, В.В. Колосенко,  
В.А. Ксенофонтов, И.М. Михайловский, Е.В. Саданов,  
А.Н. Буколов, А.А. Мазиллов

Национальный научный центр „Харьковский физико-технический институт“ НАНУ, Украина  
E-mail: mikhailovskij@kipt.kharkov.ua

Поступило в Редакцию 18 декабря 2006 г.

Предложен и реализован новый полевой многоэмиттерный источник ионов на базе наноструктурированного углерода. Показано, что коэффициент усиления электрического поля над поверхностью эмиттеров достигает  $6.5 \cdot 10^4$ . Применение метода формирования эмитирующей поверхности низкотемпературным полевым испарением обеспечило существенное повышение однородности ионной эмиссии.

PACS: 85.45.Fd, 79.40.+z, 81.07.-b

Одним из перспективных направлений использования наноструктурированных углеродных материалов является разработка эффективных ненакаливаемых источников электронов, основанных на явлении эмиссии в сильных электрических полях [1,2]. Многоэмиттерные углеродные катоды характеризуются высокими значениями локальных факторов электрического поля и соответственно сравнительно низкими значениями рабочих напряжений. Эти же преимущества могут быть использованы для разработки полевых источников ионов инертных газов [3–5] для различных отраслей физического материаловедения, ускорительной техники, детектирования сверхзвуковых молекулярных потоков и др. Трудности на пути создания высокоэффективных ионных источников связаны с относительно большими значениями напряженности поля, необходимыми для полевой ионной эмиссии, а также с нерегулярностью процесса формирования поверхности эмиттеров, основанного на полевым испарением. Обнаруженное в работах [6,7] явление

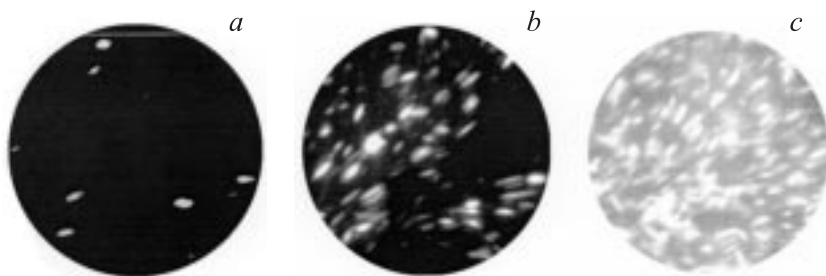
кластерного испарения углеродных материалов в электрических полях напряженностью выше  $10^{10}$  V/m существенно ограничивает применение технологии высокополевой полировки поверхности.

В настоящей работе показана возможность создания на базе наноструктурированного углерода полевого источника ионов инертных газов с развитой эмиттирующей поверхностью, эксплуатируемого при сравнительно низких рабочих напряжениях.

Полевой ионный эмиттер изготавливался в виде вольфрамового острья, на вершине которого создавался шарик из проводящей эпоксидной смолы с алюминиевым наполнителем. На поверхность шарика диаметром  $5-30 \mu\text{m}$  наносился диспергированный осадок продуктов каталитического осаждения углерода, получаемых методом газофазного пиролиза углеводородов [8] с использованием в качестве катализатора порошков никеля. Анализ используемого углеродного материала методами полевой ионной и просвечивающей электронной микроскопии обнаружил наличие нановолокон и многослойных нанотрубок.

Испытания ионного источника проводились в двухкамерном полевым ионном микроскопе с охлаждением образцов жидким гелием (4.2 K). Давление остаточных газов в рабочей камере составляло  $10^{-8}$  Pa, а давление гелия изменялось в интервале  $10^{-3}-10^{-2}$  Pa. Изображения регистрировались с помощью микроканального усилителя яркости. Необходимая для полевой ионизации напряженность поля над поверхностью сферической части источника ионов создавалась подачей на него положительного потенциала  $1-10$  kV. Расстояние  $D$  между вершиной ионного источника и тянущим электродом составляло  $3-10$  mm.

На рис. 1, *a* приведено ионное изображение полевого источника, полученное до формирования эмиттирующей поверхности при давлении гелия  $8 \cdot 10^{-3}$  Pa. Основной вклад в ионный ток вносят отдельные микровыступы на полусферической поверхности. В исходном состоянии поверхностная плотность эмиттирующих центров составляла  $(2-15) \cdot 10^9 \text{ m}^{-2}$ . Для повышения однородности распределения ионной эмиссии напряжение  $V$  увеличивалось со скоростью  $100 \text{ V/min}$  с 2.0 до 14.0 kV. При этом в результате протекания полевого испарения удалялись наиболее острые и высокие микровыступы, характеризовавшиеся максимальными значениями факторов усиления электрического поля. Как показывает приведенная серия полевых ионно-микроскопических изображений (рис. 1, *a-c*), поверхностная плотность эмиттирующих



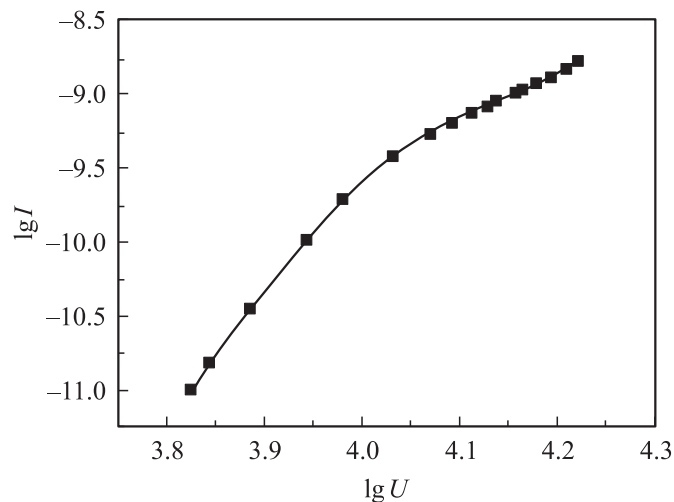
**Рис. 1.** Ионные изображения многоэмиттерного полевого источника, полученные в процессе формирования поверхности полевым испарением при напряжениях 11.0 (a), 11.5 (b) и 12.0 кВ (c).

центров возрастала на два порядка, достигая значения  $2.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$ . По завершении процесса высокополевой формирования поверхности пучки ионов, эмитируемых соседними эмиссионными центрами, перекрывались, создавая близкое к однородному полевое ионное изображение (рис. 1, c).

Напряженность электрического поля над эмитирующими элементами полевого ионного источника может быть представлена в виде  $F = \alpha\beta V/D$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  — мезо- и наномасштабные коэффициенты усиления электрического поля соответственно. Коэффициент  $\alpha$  определяется конфигурацией полевого источника ионов и в меньшей степени — формой тянущего электрода. Величина  $\beta$  зависит от геометрии нановыступов на поверхности источника, вносящих основной вклад в формирование ионного потока. Для определения  $\alpha$  можно использовать модель аппроксимации поверхности полевого источника эквипотенциалами, формируемыми точечным зарядом на конце равномерно заряженной нити [9], характеризуемыми безразмерным формфактором  $\omega$ , изменяющимся от 0 для источника параболической формы до бесконечности для сферического источника. В рамках этой модели мезомасштабный коэффициент усиления поля может быть представлен в виде

$$\alpha = \frac{D(\omega + 1)}{r_0 \left( \omega - \frac{\omega r_0}{D} + \ln\left(\frac{D}{r_0}\right) \right)},$$

где  $r_0$  — радиус кривизны у вершины полевого источника. Для использовавшихся в настоящей работе конфигураций ионных источников



**Рис. 2.** Эмиссионная характеристика многоэмиттерного полевого ионного источника при 4.2 К.

расчетные значения коэффициента  $\alpha$  изменялись от 250 ( $\omega = 1$ ) до 650 ( $\omega = 10$ ). Расчетные значения наномасштабных коэффициентов усиления электрического поля лежали в интервале 70–150. Суммарный коэффициент усиления поля изменялся в процессе формирования поверхности ионного источника полевым испарением в пределах  $(2.5\text{--}6.5) \cdot 10^4$ . Эти значения близки к максимальным коэффициентам усиления поля над вершиной углеродных нанотрубок [2].

На экспериментальном графике вольт-амперной характеристики полевого ионного источника (рис. 2) в логарифмическом масштабе выявляются две прямолинейные области с наклоном 8.1 при сравнительно низких напряженностях поля (ниже  $4.4 \cdot 10^{10}$  V/m) и 3.0 — при более высоких напряженностях поля. Такой характер вольт-амперных характеристик углеродного многоэмиттерного источника, сформированного полевым испарением, близок к токовым характеристикам металлических полевых эмиттеров [3], однако коэффициент наклона в области низких напряженностей поля приблизительно в 4 раза ниже соответствующих значений, характерных для металлических полевых эмиттеров. В области низких напряженностей поля полный ток огра-

ничен скоростью ионизации атомов гелия при столкновении их с поверхностью эмиттеров. При напряженностях поля выше поля лучшего изображения скорость полевой ионизации достаточно высока для того, чтобы ионизировать практически все захваченные поляризационными силами атомы гелия. Медленный рост тока на этом участке обусловлен увеличением радиуса области захвата, обусловленного притяжением атомов инертного газа, поляризованных в неоднородном электрическом поле, в область наибольшей напряженности поля у поверхности мультиэмиттерного полевого источника. Сравнительно низкая полевая чувствительность скорости ионизации в области сильных полей указывает на то, что полный ионный ток ограничен газовым притоком атомов гелия. Это свидетельствует о высокой эффективности выравнивания напряженности над микровыступами в процессе формирования поверхности источника полевым испарением.

## Список литературы

- [1] *Poa C.H., Henley S.J., Chen G.Y.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97. P. 114 308/1–114 308/6.
- [2] *Huang J.Y., Kempa K., Jo S.H.* et al. // *Applied Physics Letters.* 2005. V. 87. P. 053 110/1–053 110/3.
- [3] *Miller M.K., Cerezo A., Heartherington M.G., Smith G.D.W.* *Atom Probe Field Ion Microscopy.* Oxford: Clarendon, 1996. 509 p.
- [4] *Doak R.B., Ekinici Y., Holst B.* et al. // *Rev. Sci. Instr.* 2004. V. 75. P. 405–414.
- [5] *Tondare V.N.* // *J. Vac. Sci. Technol.* 2005. V. A23(6). P. 1498–1508.
- [6] *Ксенофонтов В.А., Михайловский И.М., Кулько В.Б.* // *ЖТФ.* 1983. Т. 53. С. 1583–1587.
- [7] *Hata K., Kiya Y., Ohata M., Saito Y.* // *Scripta Mater.* 2001. V. 44. P. 1571–1575.
- [8] *Гурин В.А., Гурин И.В., Левин Д.А.* // *ВАНТ.* 2004. № 3. С. 81–86.
- [9] *Березняк П.А., Слезов В.В.* // *Радиотехника и электроника.* 1972. № 2. С. 354–358.