

## Простой в изготовлении многоострый полевой эмиттер

© Г.Г. Соминский,<sup>1</sup> Е.П. Тарадаев,<sup>1</sup> Т.А. Тумарева,<sup>1</sup> М.В. Мишин,<sup>1</sup> С.Ю. Корнишин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: sominski@rphf.spbstu.ru

(Поступило в Редакцию 19 ноября 2014 г.)

Исследованы многоострые полевые эмиттеры, изготовленные путем электроэрозионной обработки поверхности молибденовых образцов. Определены их характеристики при работе с защитным активированным фуллереновым покрытием. Проведенные эксперименты свидетельствуют, что данные катоды перспективны при использовании в высоковольтных электронных устройствах, работающих в техническом вакууме.

### Введение

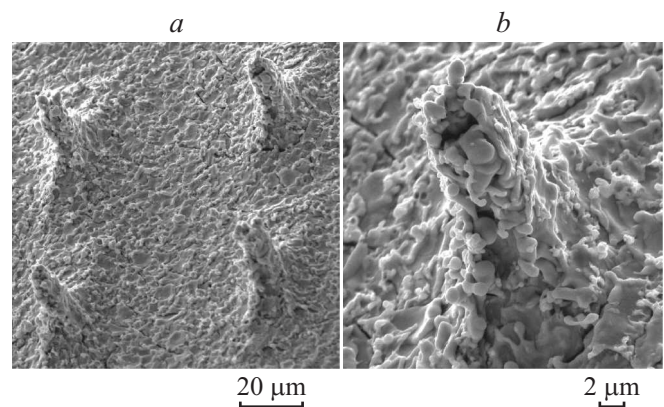
Холодные полевые эмиттеры привлекательны для использования в разнообразных вакуумных электронных устройствах. По сравнению с термокатодами такие эмиттеры обладают неоспоримыми преимуществами, так как не требуют накала и практически безынерционны, а кроме того, обеспечивают чрезвычайно большие плотности токов (ориентировочно до  $10^4 - 10^7$  А/см<sup>2</sup>), что важно при создании миниатюрных приборов. Однако практическое применение они нашли пока только в высоковакуумных (давление остаточного газа  $10^{-7}$  Па или ниже), слаботочных и низковольтных устройствах. Связано это с двумя основными обстоятельствами. Во-первых, в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме ( $10^{-4} - 10^{-6}$  Па), как правило, не удается обеспечить высокую долговечность полевых эмиттеров, которые разрушаются под действием бомбардировки ионами остаточных газов. Во-вторых, трудно обеспечить получение с помощью полевых эмиттеров достаточно больших токов.

Для получения больших токов приходится создавать распределенные полевые эмиттеры большой площади. Среди распределенных эмиттеров хорошо зарекомендовали себя многоострые (см., например, [1]), которые обеспечивают достаточно большие токи эмиссии при умеренных рабочих напряжениях. Для того чтобы защитить острые катоды от разрушающего воздействия ионной бомбардировки, в [2] разработаны и использовались специальные двуслойные металл-фуллереновые покрытия. Исследованные в [2] многоострые кремниевые эмиттеры с защитными двуслойными металл-фуллереновыми покрытиями обеспечивают средние по поверхности плотности тока эмиссии  $\sim 0.5$  А/см<sup>2</sup> и способны длительное время работать в техническом вакууме в условиях интенсивной ионной бомбардировки. К сожалению, для создания этих и других существующих многоострых катодов приходится использовать довольно сложные технологии.

В настоящей работе рассмотрена возможность использования для создания многоострых катодов достаточно простой электроэрозионной обработки.

### Методика создания и исследования многоострых катодов

Многоострые структуры изготавливались в Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород) с помощью электроэрозионной обработки торцевой поверхности стержней квадратного сечения  $1 \times 1$  мм из молибдена марки МЧВП. Для проведения такой обработки использовался стандартный отечественный станок Арта-151. Морфология поверхности катодов контролировалась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) типа Supra 45 WDXC. Вид участка одной из созданных структур, полученный с помощью РЭМ, показан на рис. 1, а. Исследованные структуры включали около 200 острий. Острия располагались на расстоянии  $\sim 70$  мкм друг от друга. Их высота варьировала в разных структурах приблизительно от 20 до 30 мкм. Вершина



**Рис. 1.** Изображения, полученные с помощью растрового электронного микроскопа: *a* — участок поверхности многоострого молибденового катода, *b* — увеличенное изображение отдельного острия. Угол съемки  $45^\circ$  к нормали.

острый имела сечение  $\sim 5 \times 5 \mu\text{m}$ . На рис. 1, *b* показано увеличенное изображения одного из острий. Регистрация изображений на рис. 1 производилась под углом  $45^\circ$  к нормали торцевой поверхности катодного стержня. Полученные данные свидетельствуют, что при использовании электроэрозионной обработки на поверхности катода, включая торцевую поверхность острий, формируется неупорядоченная система выступов, характерный размер которых существенно меньше сечения вершины острий.

Исследование характеристик созданных эмиттеров выполнено в диодной системе, построенной на основе полевого эмиссионного микроскопа — проектора, описанного в [2]. Контролировались эмиссионные характеристики катодов, а также увеличенные их изображения на экране микроскопа, который служил одновременно анодом. Расстояние между торцом катода и анодом (экраном проектора) было 1.2 см. Экспериментальный прибор подвергался непрерывной откачке и был оснащен системой напуска газа. Давление в нем регулировалось напуском азота от минимального  $\sim 10^{-8} - 10^{-7}$  Па до  $10^{-4}$  Па. Перед проведением измерений эмиссионных характеристик катоды обезгаживались прогревом при давлениях не более  $10^{-6}$  Па до температуры  $\sim 600^\circ\text{C}$ .

Измерение эмиссионных характеристик катодов проводилось при повышенном давлении  $\sim 10^{-5}$  Па. Для защиты катодов от разрушающего действия ионной бомбардировки, интенсивной в техническом вакууме, использовались разработанные авторами ранее активированные фуллереновые покрытия ([3–5]), которые создавались непосредственно в экспериментальном приборе. Методика создания и активирования фуллереновых покрытий, а также измерения их толщины описана в [2].

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как показали проведенные измерения, для катодов без защитного покрытия характерно заметное уменьшение тока эмиссии (порядка 10% в час), обусловленное действием ионной бомбардировки. Нанесение на поверхность молибденового эмиттера фуллеренового покрытия толщиной 2 монослоя вело к росту напряжений, необходимых для отбора фиксированного тока эмиссии примерно на 5%. Однако в результате активирования покрытия потоком ионов калия с энергией 40 эВ удавалось уменьшить рабочие напряжения примерно на 10%. На рис. 2 приведены типичные зависимости тока эмиссии  $I$  от времени  $t$  работы катода с активированным фуллереновым покрытием, измеренные при двух напряжениях  $U = 12.8$  и 16.5 кВ. Эмиттеры с активированным фуллереновым покрытием достаточно стабильно работали в техническом вакууме. В исследованных режимах были получены средние по поверхности катодов плотности тока эмиссии приблизительно до  $30 \text{ mA/cm}^2$ .

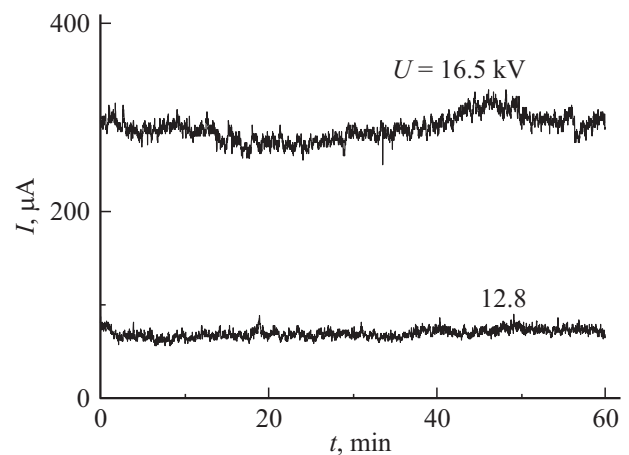


Рис. 2. Зависимости тока  $I$  эмиссии многоострийного молибденового катода с активированным фуллереновым покрытием от времени его работы  $t$ , измеренные при напряжениях  $U = 12.8$  и 16.5 кВ.

Вольт-амперная характеристика  $I(U)$  эмиттера с активированным фуллереновым покрытием, а также соответствующая характеристика Фаулера–Нордгейма приведены на рис. 3. Из наклона характеристики Фаулера–Нордгейма следует, что средний фактор уси-

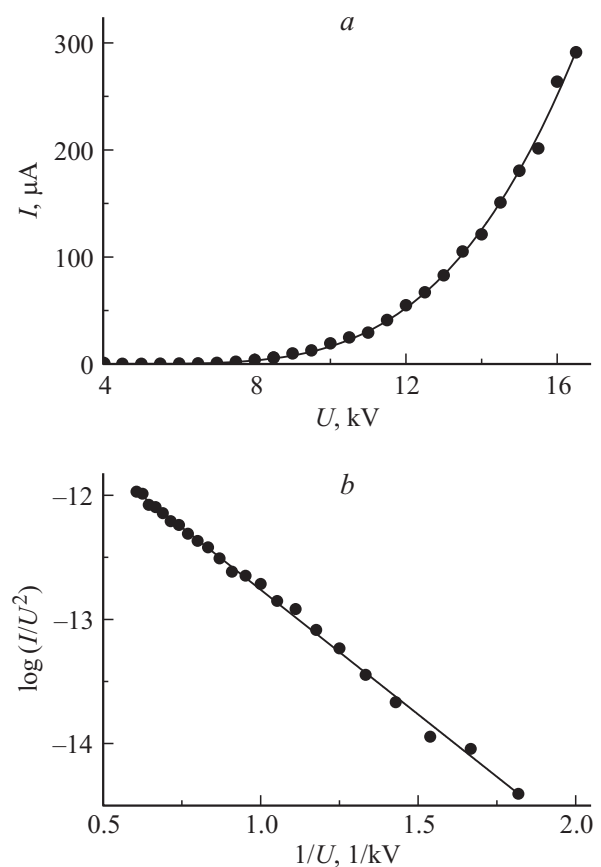


Рис. 3. *a* — вольт-амперная характеристика  $I(U)$  многоострийного катода с активированным фуллереновым покрытием, *b* — характеристика Фаулера–Нордгейма.

ления поля для исследованной многоострийной структуры имеет величину порядка  $10^4$ . Столь большое значение этого коэффициента, обусловленное усилением поля на выступах структуры, полученной в результате электроэрозионной обработки, позволяет получать токи  $\sim 300 \mu\text{A}$  с исследованных катодов при умеренных напряжениях  $\sim 16 \text{ kV}$ .

## Заключение

Экспериментально исследована полевая эмиссия многоострийных катодов, полученных путем электроэрозионной обработки молибдена. Проведенные измерения свидетельствуют, что созданные многоострийные полевые эмиттеры из молибдена с защитным активированным фуллереновым покрытием устойчивы к ионной бомбардировке и перспективны для получения больших токов эмиссии в высоковольтных электронных приборах, работающих в условиях технического вакуума.

## Список литературы

- [1] *Егоров Н.В., Шешин Е.П.* Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. Долгопрудный: Издательский дом „Интеллект“, 2011. 704 с.
- [2] *Соминский Г.Г., Тумарева Т.А., Тарадаев Е.П., Мишин М.В., Степанова А.Н.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 1. С. 138–142.
- [3] *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 7. С. 121–124.
- [4] *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Ефремов А.А., Поляков А.С.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 105–110.
- [5] *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Бондаренко А.К., Веселов А.А., Светлов И.А.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 81–84.