

## Полевая электронная эмиссия композитных катодов с наноструктурной поверхностью

© С.М. Лупехин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 191186 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: sm150@mail.ru

(Поступило в Редакцию 4 декабря 2014 г.)

Проведены экспериментальные исследования полевой электронной эмиссии композитных медно-углеродных (Cu–C) катодов с наноструктурной поверхностью. Эмиссионная поверхность катодов формировалась методом высоковольтного вакуумного разряда. Изучены морфология и элементный состав эмиссионной поверхности. Вольт-амперные характеристики катодов исследованы при рабочих напряжениях 1.8–5.6 kV и зазорах анод–катод 0.5 mm. Установлено, что в условиях технического вакуума при указанных напряжениях эмиссионный ток Cu–C-катада составлял 5–270  $\mu\text{A}$ .

### Введение

Исследования полевой электронной эмиссии катодов с эмиссионной поверхностью, созданной на основе наноструктурированного углерода, вызывает неизменный интерес. Это прежде всего связано с возможностью создания полевых электронных эмиттеров с высокой стабильностью и воспроизводимостью эмиссионных характеристик в условиях технического вакуума.

К настоящему времени полевые эмиссионные свойства наноструктурных углеродных пленок и композитных пленок на основе углерода недостаточно изучены. Тем не менее существует достаточно большое количество экспериментальных [1–5] и теоретических [6,7] работ, указывающих на хорошую перспективу создания высокоэффективных катодов на основе наноструктурной углеродной поверхности.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования эмиссионных характеристик полевых планарных композитных Cu–C-катодов с наноструктурной эмиссионной поверхностью, работающих в условиях технического вакуума. Изучена морфология и проведен рентгеноспектральный анализ элементного состава эмиссионной поверхности.

### Методика эксперимента

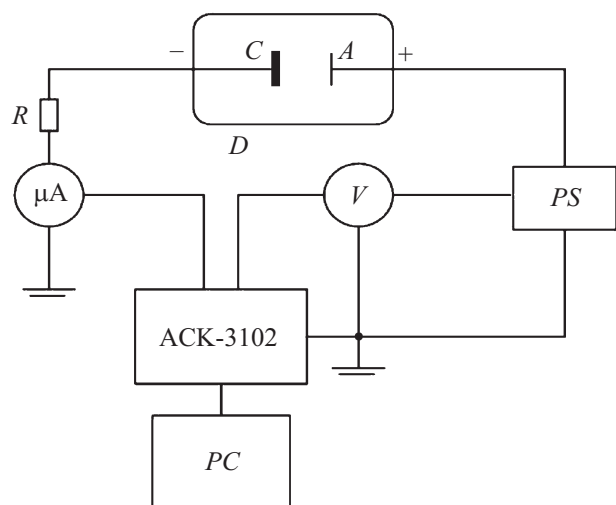
Эмиссионные свойства композитного медно-углеродного катода экспериментально исследовались на специально созданных образцах планарных катодов с наноструктурной эмиссионной поверхностью. Рабочее тело катода изготавливалось из вакуумно чистой меди в виде плоского диска диаметром  $d_k = 4\text{ mm}$  и толщиной  $h = 1\text{ mm}$  с цилиндрической контактной ножкой — держателем. Катод устанавливался в вакуумной диодной системе на металлическом вакуумно-изолированном высоковольтном вводе.

Исследования эмиссионных процессов проводились в диоде с плоским круглым анодом из меди диаметром

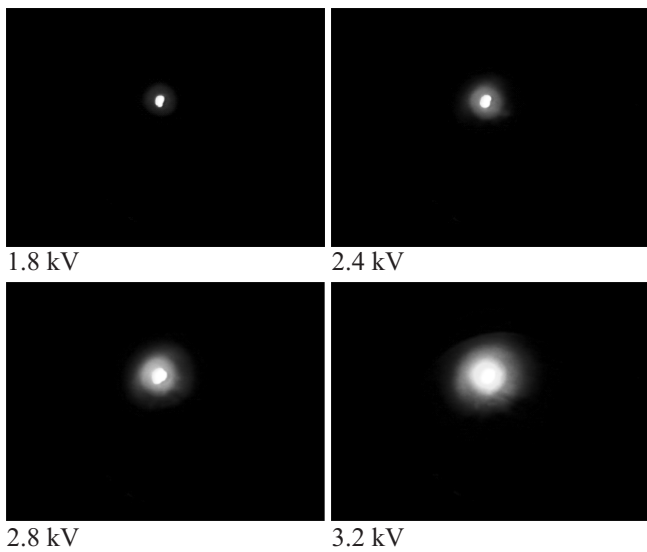
$d_a = 30\text{ mm}$ . Диод конструктивно располагался в металлокерамической вакуумной камере, имеющей систему динамической безмасляной вакуумной откачки до давлений  $P \sim 10^{-4} - 10^{-5}\text{ Pa}$ . Расстояние между плоским катодом и плоским анодом составляло  $D_{ka} = 0.5\text{ mm}$ .

Электронный ток с катода  $I_k$  и рабочее напряжение диода  $U_{ak}$  регистрировались цифровым 2-канальным самописцем АСК-3102. Схема подключения регистрирующей системы к диоду приведена на рис. 1.

Для изучения геометрии электронного пучка, сформированного в процессе полевой электронной эмиссии (ПЭЭ), использовалась диодная система с анодом в виде проводящего люминесцентного экрана. Расстояние катод — анод  $D_{ka} = 0.5\text{ mm}$ . Цифровое изображение отпечатка электронного пучка на люминесцентном экране, представленное на рис. 2, регистрировалось цифровой видеокамерой с сохранением видеофайла на ПК.



**Рис. 1.** Схема измерительной установки:  $D$  — вакуумный диод,  $C$  — катод,  $A$  — анод,  $R$  — ограничительное сопротивление,  $\mu\text{A}$  — микроамперметр,  $V$  — вольтметр,  $PS$  — источник питания, АСК-3102 — цифровой самописец,  $PC$  — персональный компьютер.



**Рис. 2.** Цифровое изображение отпечатка электронного пучка при различных рабочих напряжениях.

Для формирования наноструктурной эмиссионной поверхности катода использовался оригинальный метод модифицирования поверхности твердого тела [8,9]. В основе метода лежит воздействие плазмы импульсного высоковольтного вакуумного разряда, ионного пучка из плазмы и электронного пучка на твердотельную мишень. Морфология сформированной эмиссионной поверхности и элементный состав исследовались в растровом электронном микроскопе (РЭМ) CarlZeiss серии EVO MA/LS с встроенным рентгеновским спектрометром. Наноморфология эмиссионной поверхности исследовалась с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) марки NTMDT-4P.

## Результаты эксперимента

В процессе экспериментальных исследований зарегистрирована ПЭЭ планарных медно-углеродных катодов при рабочих напряжениях  $U_{ak} = 1.8–5.6$  kV. Катод работал в условиях технического вакуума в интервале давлений  $P \sim 10^{-4}–10^{-5}$  Pa. Проведены исследования эмиссионных характеристик катодов с диаметром плоской эмиссионной поверхности  $d_k = 4$  mm и расстоянием анод–катод  $D_{ak} = 0.5$  mm.

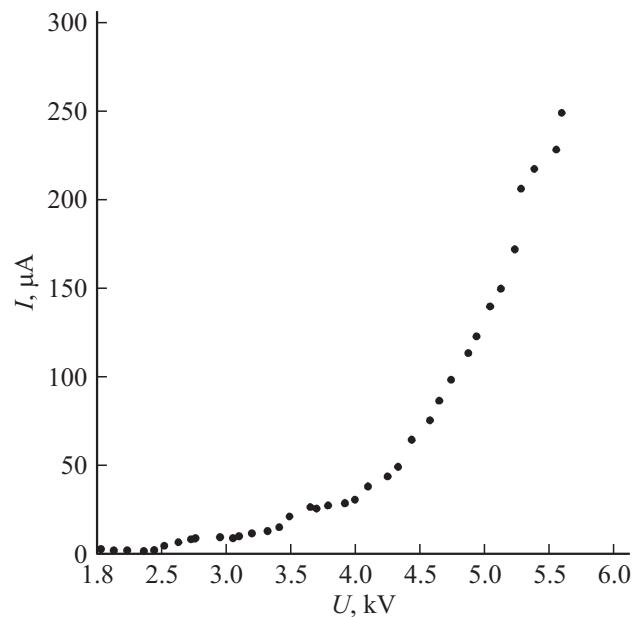
Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) катода приведена на рис. 3. Минимальный устойчивый ток с катода  $I_{k \min} = 5.0$   $\mu$ A зарегистрирован при рабочем напряжении  $U_{ak} = 1.8$  kV. Максимальное значение тока  $I_{k \max} \approx 270$   $\mu$ A достигнуто при  $U_{ak} = 5.6$  kV. В процессе работы катода среднее значение напряженности электрического поля у эмиссионной поверхности плоского катода в начале устойчивой полевой эмиссии составляло  $E = 3.6 \cdot 10^4$  V/cm. Полученные зависимости  $I_k = f(U_{ak})$  не подчиняются закону Фаулера–Нордгейма.

Изображения электронного пучка, приведенные на рис. 2, зарегистрированы при различных рабочих на-

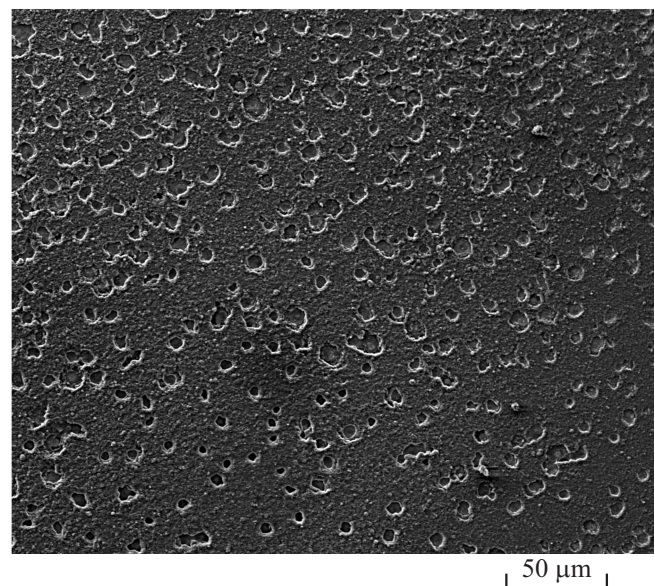
пряжениях  $U_{ak}$  в интервале 1.8–3.2 kV. По мере увеличения  $U_{ak}$  линейные размеры сечения пучка увеличиваются, при этом вокруг основного пятна появляется диффузное свечение. Структура пятна не изменяется и представляет собой сплошное однородное пятно.

В результате исследований морфологии и элементного состава эмиссионной поверхности получены данные о характере ее наноструктурного рельефа и особенностях элементного состава.

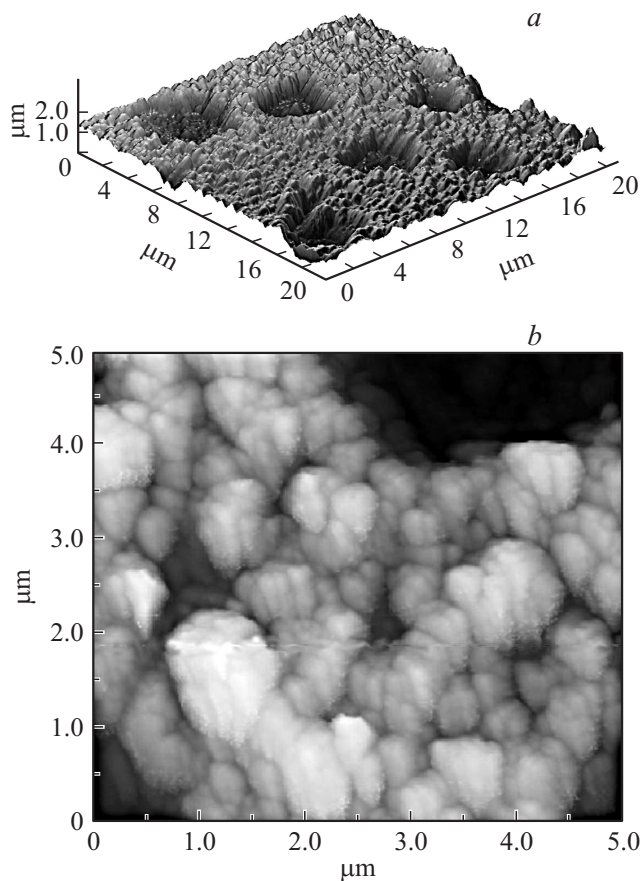
На рис. 4 приведено характерное изображение поверхности, полученное в РЭМ. Микрорельеф поверхности



**Рис. 3.** Вольт-амперная характеристика планарного полевого CuC-катаода.



**Рис. 4.** Характерные изображения эмиссионной поверхности CuC-катаода, полученные в РЭМ.



**Рис. 5.** Изображение нанорельефа эмиссионной поверхности CuC, полученные на АСМ: *a* — изображение фрагмента с кратерной структурой; *b* — изображение фрагмента кластерной наноструктуры.

имеет характерные впадины (кратеры), равномерно расположенные по всей поверхности. Относительная доля площади поверхности, которую занимают кратеры, составляет 25–30%. Рентгеноспектральный анализ поверхностного слоя толщиной  $h \approx 100$  нм показал наличие на поверхности композитного слоя, сформированного из меди и углерода. Процентный состав атомов меди в области кратеров 20–30%, атомов углерода 70–80%. На поверхности вне кратеров содержание атомов углерода  $\approx 90\%$ , атомов меди  $\approx 10\%$ .

Исследование нанорельефа поверхности в АСМ показало, что вся рабочая поверхность катода, включая кратеры, покрыта характерными плотно упакованными нанокластерными образованиями (рис. 5). Линейные размеры кластеров  $L_k = 100$ – $200$  нм. Средняя глубина рельефа поверхности вне кратеров  $H \approx 100$  нм. Средняя глубина кратера  $H_k \approx 500$ – $800$  нм.

## Обсуждение результатов

Исследование эмиссионных свойств рабочей поверхности катода в виде тонкой медно-углеродной пленки,

созданной методом высоковольтного вакуумного разряда, привело к следующим важным результатам.

Полученный композитный материал обладает достаточно высокой эмиссионной способностью при низких значениях рабочего напряжения  $U_{ak} = 1.8$ – $5.6$  кВ. При этом напряженность электрического поля составляет  $\sim 10^4$  В/см. Катод устойчиво работает в условиях технического вакуума при  $P \sim 10^{-4}$ – $10^{-5}$  Па.

Исследование нано- и микрорельефа эмиссионной поверхности показало, что геометрия существующего микрорельефа рабочей поверхности не приводит к усилению напряженности электрического поля до автоэмиссионных значений  $E \sim 10^6$ – $10^7$  В/см за счет геометрического фактора. Следовательно, механизм полевой электронной эмиссии нельзя рассматривать как классический автоэмиссионный, подчиняющийся закону Фаулера–Нордгейма. Этот факт подтверждается нелинейным характером зависимости  $I_k = f(U_{ak})$  в координатах Фаулера–Нордгейма в указанном интервале рабочих напряжений.

Механизм формирования эмиссионного процесса для подобных углеродных наноструктур рассмотрен в работах [6,7]. На качественном уровне представленная модель достаточно корректно объясняет полученные в настоящей работе результаты. Наиболее вероятно, что основную роль в эмиссионном процессе играет углеродная наноструктура. Медь в составе материала эмиссионной поверхности может существенно влиять на стабилизацию эмиссии, поскольку имеет высокую электро- и теплопроводность. Это косвенно подтверждается стабильной работой катода в течение десятков часов.

Структура полученного отпечатка электронного пучка указывает на то, что на рабочей поверхности катода формируется сплошная область ПЭЭ с четко обозначенной границей. При этом площадь эмиссионного источника расширяется с увеличением рабочего напряжения (рис. 2). Изучение данных по наноструктуре эмиссионной поверхности совместно с зарегистрированным изображением электронного пучка привело к предположению, что в процессе эмиссии работает область катода с плотно упакованными эмиссионными центрами. Формирование центров, вероятно, связано с кластерной наноструктурой эмиссионной поверхности.

## Заключение

Экспериментальное исследование ПЭЭ планарных медно-углеродных катодов, рабочая поверхность которых сформирована методом высоковольтного вакуумного разряда, привело к следующим результатам.

Созданные катоды устойчиво работают при давлении остаточных газов  $\sim 10^{-4}$ – $10^{-5}$  Па и рабочих напряжениях  $\sim 10^3$  В. Значение эмиссионного тока составляет  $\sim 10^{-6}$ – $10^{-4}$  А.

На рабочей поверхности катода формируется сплошная область полевой эмиссии, связанная, очевидно, с работой плотно упакованных эмиссионных центров.

Таким образом, использование оригинальной методики формирования эмиссионной поверхности полевых планарных  $Cu-C$ -катодов привело к созданию эффективных электронных источников, стабильно работающих в условиях технического вакуума при низких рабочих напряжениях. При этом напряженность электрического поля составляет  $\sim 10^4$  V/cm.

## Список литературы

- [1] Бобков А.Ф., Давыдов Е.В., Зайцев С.В. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 6. С. 367–371.
- [2] Суздальцев С.Ю., Яфаров Р.К. // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 2. С. 367–371.
- [3] Белянин А.Ф., Самойлович М.И. и др. // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 8. С. 39–48.
- [4] Ляшенко С.А., Волков А.П., Образцов А.Н. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 2. С. 94–98.
- [5] Рахимов // УФН. 2000. Т. 170. № 9. С. 996–998.
- [6] Образцов А.Н., Волков А.П., Павловский И.Ю. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 69. Вып. 5. С. 381–386.
- [7] Образцов А.Н., Волков А.П., Павловский И.Ю. // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 68. Вып. 1. С. 56–60.
- [8] Лупехин С.М. // Патент № 121813. 30.03.2012 г.
- [9] Лупехин С.М., Ибрагимов А.А. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 6. С. 134–138.