

Полевая электронная эмиссия катодов из углеродных нитей с наноструктурной эмиссионной поверхностью

© С.М. Лупехин, А.А. Ибрагимов

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

(Поступило в Редакцию 26 октября 2010 г.)

Проведены экспериментальные исследования полевой электронной эмиссии катодов из углеродных нитей в условиях технического вакуума. Предложена модель для оптимизации автоэмиссионных свойств катода через расчет его оптимальной макрогеометрии с учетом структуры эмиссионной поверхности. Исследованы вольт-амперные характеристики катода из пучка углеродных нитей при рабочих напряжениях 1–3 кВ и зазорах анод–катод 1–10 мм. Получены предельные плотности тока с катода больше 10 А/см².

Введение

В области исследования полевой электронной эмиссии углеродных катодов получено достаточно большое количество экспериментального и теоретического материала [1,2]. Особый интерес вызывают эмиссионные свойства катодов из углеродных нитей в силу достаточно высокой эмиссионной стабильности этих катодов в условиях технического вакуума [3]. Однако для ряда научных и технических приложений, например, для использования холодных катодов в мощных электронных вакуумных приборах, их эмиссионная способность не достаточна. Одним из возможных решений этой задачи может быть повышение коэффициента усиления электрического поля при оптимизации макрогеометрии рабочего тела катода.

1. Описание модели

Рассмотрим модель катода из углеродных нитей в соответствии с теорией Фаулера–Нордгейма, в которой плотность эмиссионного тока катода определяется выражением:

$$j = 1.55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\varphi} \exp\left(-6.86 \cdot 10^7 \frac{\varphi^{3/2}}{E} \theta(y)\right), \quad (1)$$

где φ — работа выхода рабочего материала катода, в нашем случае углерода (eV); E — напряженность поля (V/cm) у эмиссионной поверхности катода; $\theta(y)$ — табулированная функция [4].

Напряженность электрического поля у эмиссионной поверхности катода E можно определить через разность потенциалов U , приложенную к системе электродов катод–анод, как $E = \beta_0 U$, где $\beta_0 = 1/d$ — так называемый форм-фактор, d — приведенное расстояние между эмиссионной поверхностью катода (см⁻¹) и поверхностью анода $d = d_{ac}/\beta$, где d_{ac} — расстояние анод–катод (см), β — коэффициент усиления поля, определяемый путем учета реальной геометрии катода.

При заданной работе выхода рабочего материала катода (в нашем случае для углерода $\varphi = 4.7$ eV) плотность тока с катода j и соответственно полный ток I будут зависеть только от коэффициента усиления поля β . В свою очередь, β определяется исключительно геометрией катода. В выбранной нами модели рассматривается геометрия катода, приведенная на рис. 1.

Это система, состоящая из двух тонких цилиндров. Малый цилиндр находится на поверхности большого и его открытая торцевая поверхность является эмиссионной поверхностью катода. Для данной геометрии известно соотношение, определяющее величину β

$$\beta = \beta_1 \beta_2, \quad (2)$$

где β_1, β_2 — коэффициенты усиления электростатического поля на большом и малом цилиндре соответственно.

С учетом геометрических факторов для цилиндров коэффициенты усиления поля на каждом из них можно определить как $\beta_1 = h_1/2r_1$, где h_1, r_1 — высота и радиус

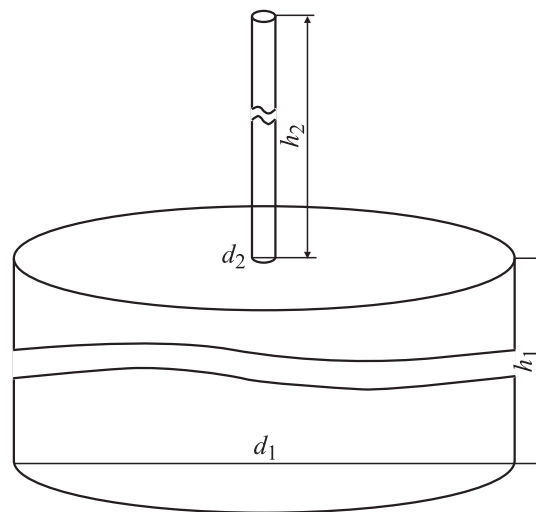


Рис. 1. h_1, d_1 — высота и диаметр большого цилиндра, h_2, d_2 — высота и диаметр малого цилиндра.

большого цилиндра соответственно [5]; $\beta_2 = h_2/2r_2$, где h_2, r_2 — высота и радиус малого цилиндра соответственно.

Таким образом, величину плотности тока j можно рассчитать по формуле (1), учитывая, что $E = (\beta_1\beta_2U/d_{ac})$. С учетом рассмотренной конфигурации катода получим

$$E = \frac{h_1 h_2}{4r_1 r_2} \frac{U}{d_{ac}}. \quad (3)$$

Для эффективной работы полевого катода необходимо $E \approx 10^7 - 10^8$ В/см. Наиболее интересен случай работы катода при напряжении $U = (1-3)$ кВ. Теоретические расчеты показывают, что для достижения такой напряженности поля при данном U необходимо, чтобы аспектные отношения цилиндров удовлетворяли условиям:

$$\frac{h_1}{d_1} \geq 10^2, \quad \frac{h_2}{d_2} \geq 10^2. \quad (4)$$

Для выполнения условия (4), в случае реально возможной геометрии, необходимо, чтобы геометрические параметры катода имели следующие значения: $h_1 \approx 10^{-4}$, $d_1 \approx 10^{-6}$, $h_2 \approx 10^{-7}$, $d_2 \approx 10^{-9}$ м.

2. Эксперимент

В работе исследовались эмиссионные характеристики полевых катодов из полиакрилонитрильных (ПАН) углеродных нитей цилиндрической геометрии, в условиях технического вакуума, $P = 10^{-5} - 10^{-7}$ Торр. Диапазон рабочих напряжений $U = 1 - 3$ кВ. Геометрия катода подбиралась таким образом, чтобы выполнялись условия (4).

Конструктивно катод выполнен в виде совокупности нитей равной высоты $h_1 = 10$ мм. Диаметр каждой нити $d = 7$ мкм. В исследуемом катоде нити упакованы в форме цилиндра с общей эмиссионной поверхностью диаметром $d_1 = 100$ мкм. Каждая нить имеет развитую торцевую эмиссионную поверхность, состоящую из фибрилл диаметром $d_2 \approx 10^{-9}$ м и высотой $h_2 \approx 10^{-7}$ м. Таким образом, общая геометрия катода удовлетворяет условиям принятой рабочей модели. В данном случае $E = (3-5) \cdot 10^7$ В/см при используемом в эксперименте зазоре анод–катод $d_{ac} = 1$ и 10 мм.

Электрический контакт углеродных волокон с подложкой катода обеспечивался вакуумным проводящим клеем на основе серебра.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) катода исследовались в вакуумной диодной системе с плоским металлическим анодом диаметром 30 мм. Схема диода вместе с подключенной к нему схемой измерения рабочих напряжений и токов, а также схемой подключения источника высокого напряжения приведена на рис. 2. Значения тока и напряжения снимались одновременно двухканальным цифровым самописцем АСК-3102 и обрабатывались с помощью программной базы самописца.

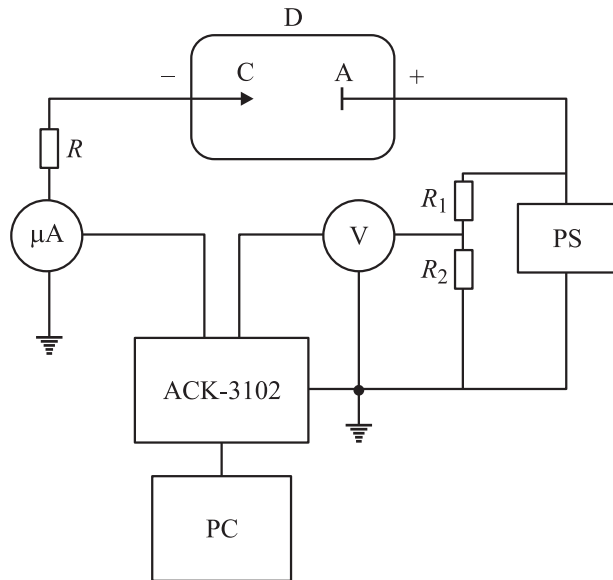


Рис. 2. Схема измерительной установки: D — вакуумный диод; C — катод; A — анод; R — ограничительное сопротивление, $R = 1$ МΩ, μA — микроамперметр; V — вольтметр; PS — источник питания; $R_1 = 100$ МΩ, $R_2 = 100$ кΩ — сопротивления делителя; АСК-3102 — цифровой самописец; PC — персональный компьютер.

По обработанным данным строились вольт-амперные характеристики образца катода.

Типичные ВАХ катода для зазоров $d_{ac} = 1$ и 10 мм приведены на рис. 3, в координатах Фаулера–Нордгейма — на рис. 4. В процессе измерений шаг изменения рабочего напряжения составлял $\Delta U = 200 \pm 10$ В. Анализ полученных характеристик выявил следующие закономерности работы катода. Зависимость тока от приложенного напряжения имеет экспоненциальный характер, при этом в координатах Фаулера–Нордгейма получены линейные характеристики. Сравнение ВАХ для зазоров $d_{ac} = 1$ и 10 мм показало, что при уменьшении зазора происходит увеличение напряженности электрического поля на катоде в соответствии с условиями предложенной модели и повышении предельных значений тока в 7 раз при максимальных и равных напряжениях $U_{max} = 3$ кВ.

В настоящей работе в качестве минимального порогового значения тока выбиралось $I_{min} \approx 10^{-6}$ А и соответствовало рабочему напряжению $U_{min} = 1$ кВ для $d_{ac} = 1$ мм и $U_{min} = 1.5$ кВ — для $d_{ac} = 10$ мм.

Максимальная плотность тока с общей эмиссионной поверхности катода достигалась при $U_{max} = 3$ кВ для $d_{ac} = 1$ мм и составляла $j = 12.8$ А/см². Необходимо особо отметить, что для зазора $d_{ac} = 10$ мм максимальная плотность также значительна и равна $j = 1.9$ А/см².

Проверка эмиссионных характеристик на воспроизводимость показала, что относительное отклонение значений тока в случае проведения измерений с повышением напряжения, а затем с понижением напряжения

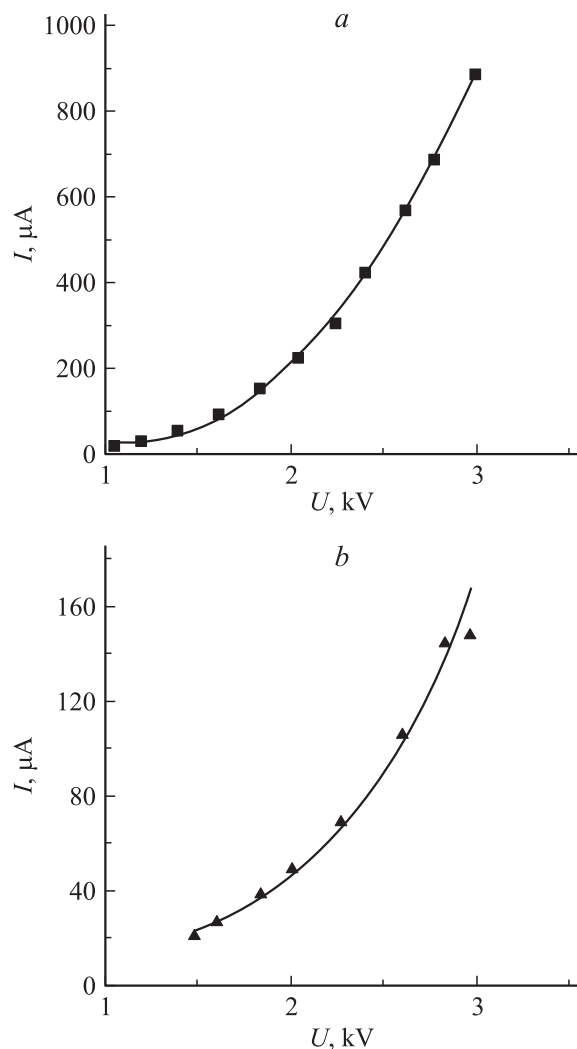


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики для различных диодных зазоров: a — $d_{ac} = 1$, b — $d_{ac} = 10$ mm.

не превышают 10%. При этом явления гистерезиса не наблюдается.

3. Обсуждение результатов

На основании выбранной эмиссионной модели создан полевой катод, эмиссионная эффективность которого базируется на оптимизации геометрических параметров и использовании ПАН углеродных нитей в качестве рабочего материала. Рассчитанная в соответствии с моделью геометрия катода позволила получить эмиссию с высокой средней плотностью тока катода $j = 1.9\text{--}12.8 \text{ A/cm}^2$ при значительном расстоянии катод–анод $d_{ac} \approx 10^{-3}\text{--}10^{-2} \text{ m}$ и небольших рабочих напряжениях $U = 1\text{--}3 \text{ kV}$. Тем не менее теоретически рассчитанная плотность тока много больше плотности тока, полученной в эксперименте. Используя формулу (1), можно провести теоретический расчет плотности тока эмиссии при работе выхода углерода 4.7 eV [6]

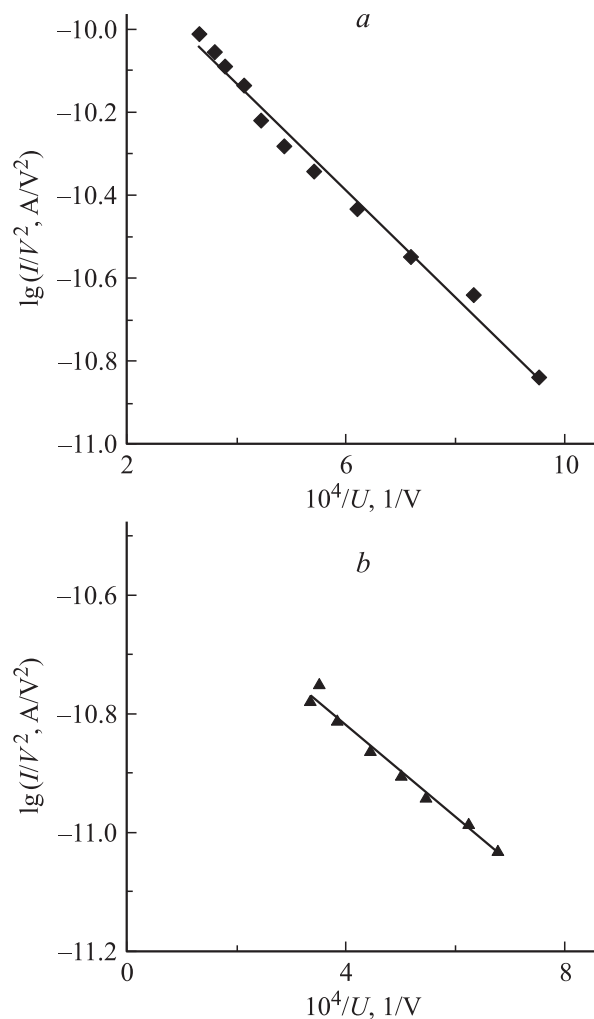


Рис. 4. Кривые Фаулера–Нордгейма для различных зазоров: a — $d_{ac} = 1$, b — $d_{ac} = 10$ mm.

и напряженности электрического поля $E = 4 \cdot 10^7 \text{ V/cm}$. В этом случае плотность тока эмиссии составляет $j = 3.06 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$. Максимальное экспериментальное значение плотности тока 12.8 A/cm^2 .

Высокий уровень стабильности работы катода, воспроизводимость ВАХ можно, прежде всего, связать с воспроизводимостью микрогеометрии эмиссионной поверхности. В условиях технического вакуума поверхность катода подвержена интенсивной ионной бомбардировке и, следовательно, разрушению. К разрушению может привести и режим интенсивного токоотбора. Однородную микроструктуру поверхности формируют микровыступы (фибриллы), ориентированные в направлении оси нити [7]. В свою очередь, фибриллы послойно формируют однородную структуру нити по всей длине. Таким образом, даже при разрушении микрогеометрии поверхности ионами и под воздействием сильноточного режима микроструктура поверхности в процессе токоотбора должна воспроизводиться.

4. Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что для углеродного полевого катода оптимизация его макрогеометрии, с учетом микрогеометрии эмиссионной поверхности, приводит к росту коэффициента усиления поля до величины $\beta = (1-5) \cdot 10^4$ и соответственно, — к значительному увеличению эмиссионной способности катода. Средняя плотность тока с катода может достигать значений, сравнимых с плотностью тока термокатодов даже при зазорах катод—анод $d_{ac} \approx 10^{-2}$ м.

Выбор углеродных нитей в качестве рабочего материала катода позволил создать электронный эмиттер, эффективно работающий в условиях технического вакуума.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 080-10-054/22.

Список литературы

- [1] *Шешин Е.П.* Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: МФТИ, 2001. 287 с.
- [2] *Елецкий А.В.* // УФН. 2010. Т. 180. Вып. 9. С. 897–930.
- [3] *Бондаренко Б.В., Рыбаков Ю.Л., Шешин Е.П.* // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27. Вып. 8. С. 1593–1597.
- [4] *Елинсон М.И., Васильев Г.Ф.* Автоэлектронная эмиссия. М.: ГИФМЛ, 1958. 272 с.
- [5] *Месяц Г.А.* Экситоны. Екатеринбург: УИФ „Наука“, 1993. 184 с.
- [6] *Бобков А.Ф., Давыдов Е.В.* и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 6. С. 95–103.
- [7] *Мелешко А.И., Половников С.П.* Углерод. Углеродные волокна. Углеродные композиты. М.: Сайнс-Пресс, 2007. 197 с.