

08

Работа полевых эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в техническом вакууме

© Т.А. Тумарева, Г.Г. Соминский

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sominski@phf.spbstu.ru

(Поступило в Редакцию 26 сентября 2012 г.)

Исследована работа острых вольфрамовых полевых эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в техническом вакууме. Разработаны способы тренировки эмиттеров, обеспечивающие самовоспроизводимость покрытий и долговечную их работу в условиях интенсивной ионной бомбардировки в широком интервале давлений $2 \cdot 10^{-8} < p < (5-7) \cdot 10^{-7}$ Торг и отбираемых токов эмиссии $(1.5-2) < I < (10-20) \mu\text{A}$.

Введение

Полевые эмиттеры привлекательны для использования в вакуумной электронике, но их применению препятствуют трудности обеспечения высокой долговечности таких эмиттеров в условиях технического вакуума, а также получения с их помощью достаточно больших токов эмиссии I , необходимых для функционирования широкого круга электронных устройств [1]. Одной из важнейших причин выхода из строя полевых эмиттеров является ионная бомбардировка их поверхности, интенсивная в высоковольтных приборах, работающих в техническом вакууме. В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете были разработаны фуллереновые покрытия и получены данные, свидетельствующие о возможности их использования в качестве защитных от разрушающего воздействия ионной бомбардировки [1–5]. На начальном этапе исследовалась работа одиночных острых вольфрамовых эмиттеров с фуллереновыми покрытиями. Фуллереновые покрытия отличаются большой работой выхода ($\sim 5.3-5.4 \text{ eV}$). Однако создание на их поверхности распределенной структуры близких по размерам выступов, усиливающих электрическое поле, позволяло эксплуатировать эмиттеры с фуллереновыми покрытиями при умеренных рабочих напряжениях. Дополнительное и существенное снижение рабочих напряжений достигалось в результате активирования фуллереновых покрытий потоком медленных ($40-100 \text{ eV}$) ионов калия. Поток медленных ионов калия формирует в покрытии молекулы металлофуллеренов типа эндэдралов ($C_{60}@K$) и/или экзэдралов ($K@C_{60}$). В результате удается снизить работу выхода покрытия на $1.5-2.0 \text{ eV}$.

Основное внимание в предыдущих работах [1–5] уделялось исследованию возможности использования активированных фуллереновых покрытий в экстремальных условиях, когда с катода с покрытием отбираются токи, близкие к предельным I_m . Были определены достижимые токи в сверхвысоком вакууме $\sim 10^{-9}$ Торг, а также механизмы разрушения покрытий при токах, превышающих

предельное значение. Была продемонстрирована возможность существенного (до двух–трех раз) увеличения предельных токов при работе эмиттеров в техническом вакууме $\sim 10^{-7}$ Торг и выявлен механизм самовоспроизведения структуры поверхности активированных фуллереновых покрытий в условиях интенсивной ионной бомбардировки. Суть этого механизма состоит в следующем. Быстрые ионы, бомбардирующие эмиттер, слабо взаимодействуют с покрытием и большую часть своей энергии выделяют в подложке. Ионы практически не разрушают и не десорбируют молекулы покрытия, но по дороге к подложке они разрушают некоторые выступы на его поверхности. Высвободившиеся из выступов поляризованные молекулы фуллеренов и металлофуллеренов перемещаются по поверхности эмиттера под действием сильно неоднородных полей и быстро захватываются соседними выступами или формируют новые. В результате токи эмиссии флюктуируют, но средние их значения меняются во времени слабо. Именно этот механизм обеспечивает высокую долговечность эмиттеров в условиях интенсивной ионной бомбардировки при токах эмиссии, близких к предельным.

Одиночные острые эмиттеры с активированным фуллереновым покрытием с радиусом вершины $0.3-0.7 \mu\text{m}$ обеспечивали в техническом вакууме предельные токи $I_m \approx 100-130 \mu\text{A}$. Однако во многих приложениях требуются значительно большие токи. Так, например, для создания даже сравнительно маломощных СВЧ-устройств и мобильных переносных источников рентгеновского излучения необходимы токи порядка или более нескольких десятков миллиампер [1,6–8]. Токи такого масштаба принципиально могут быть обеспечены многоострыми структурами полевых эмиттеров [1,9].

В широко используемых высоковольтных электронных устройствах все существующие к настоящему времени многоострые полевые эмиттеры деградируют в условиях технического вакуума под действием бомбардировки ионами остаточного газа [1]. Поэтому большой интерес представляет рассмотрение возможности использования фуллереновых покрытий для защиты

многоострийных полевых эмиттеров от разрушающего воздействия ионной бомбардировки.

В многоострийной структуре полевых эмиттеров практически невозможно обеспечить полную идентичность формирующих ее острий. В связи с этим многоострийные структуры работают обычно в условиях, когда ток с каждого острия существенно меньше предельной величины, типичной для одиночных острий такого типа. Возможность реализации механизма самовоспроизведения структуры фуллереновых покрытий при разных отбираемых токах эмиссии и давлениях газа в вакуумном приборе не очевидна. Поэтому в настоящей работе была экспериментально исследована работа острийных эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в широком интервале токов эмиссии и давлений газа.

1. Методика измерений и аппаратура

Исследования проводились с использованием вакуумной установки с полевым эмиссионным микроскопом-проектом [1]. Для контроля процессов на поверхности эмиттера регистрировались увеличенные ориентировочно до 10^6 раз эмиссионные изображения эмиттера на экране проектора. Установка оснащена системой напыления фуллереновых покрытий, а также источником ионов калия K^+ , который использовался для активирования покрытий. Источник обеспечивал плотности потока ионов на катод примерно до 10^{-6} А/см². Активирование покрытий производилось потоком ионов с энергией $W_i = 40$ eV.

Вакуумная установка подвергалась непрерывной откачке. Использование системы напуска газов позволяло исследовать работу катодов в широком интервале давлений остаточного газа, а также при напуске в вакуумную систему азота. Давление газов в приборе можно было оперативно менять в пределах приблизительно от 10^{-10} до 10^{-6} Торр и обратно.

Исследована работа с защитными фуллереновыми покрытиями острийных эмиттеров из вольфрама со слоем карбида вольфрама на поверхности. Методика создания и активирования фуллереновых покрытий потоком ионов калия описана в работе [4]. Формирование и активирование покрытий проводилось по оперативной одноступенчатой методике [4].

2. Результаты исследования и их обсуждение

Наибольшее внимание было уделено изучению работы эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями при умеренных токах $I \ll I_m$ и давлениях $10^{-8} - 10^{-6}$ Торр, типичных для используемых на практике электронных устройств.

Как было показано в предыдущих исследованиях [1–5], в сверхвысоком вакууме (при давлениях $\leq 10^{-9}$ Торр)

действие неоднородных полей у поверхности эмиттера ведет при отборе тока эмиссии к формированию сильных неоднородностей в исходно достаточно однородной распределенной структуре выступов на поверхности покрытия. При неизменном напряжении высота некоторых выступов увеличивается во времени даже при умеренных начальных токах. В результате возрастают поля у выделенных по своей высоте выступов и плотности тока с их поверхности. Если этот рост не остановить, выключив напряжение или уменьшив его величину, происходит разрушение выделенных выступов или покрытия в целом. Важно понять, можно ли избежать нарушения однородности распределенной структуры покрытия и обеспечить стабильную работу эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в условиях повышенной интенсивности ионной бомбардировки при давлениях $p \gg 10^{-9}$ Торр.

Типовая подготовка эмиттера к работе включала следующие основные операции. Сначала в сверхвысоком вакууме $\leq 10^{-9}$ Торр на поверхность острийного эмиттера наносилось фуллереновое покрытие толщиной ~ 2 монослоя. Затем производилось его активирование потоком ионов. Далее давление в экспериментальном приборе увеличивалось до некоторой фиксированной величины более 10^{-9} Торр и производилось измерение эмиссионных характеристик катодов при повышенном давлении. При малых начальных отбираемых токах менее $3 \mu A$ и давлениях $p < 1 \cdot 10^{-8}$ Торр ток быстро падал при постоянном напряжении и стабилизировался на уровне $\sim 1.5 - 2 \mu A$. При столь малых давлениях и начальных токах более $3 - 5 \mu A$ эмиссия обычно быстро нарастала во времени в результате увеличения высоты небольшого количества центров эмиссии. Стабилизировать работу эмиттеров в широком интервале токов эмиссии удавалось лишь при давлениях $2 \cdot 10^{-8} < p < (5 - 7) \cdot 10^{-7}$ Торр. При начальных токах эмиссии $\sim 5 - 10 \mu A$ и в этом интервале давлений сначала происходило увеличение токов эмиссии. Однако если после достижения токов $\sim 9 - 25 \mu A$ понизить напряжение и установить меньший ток эмиссии, работа эмиттера становилась более стабильной. В некоторых случаях для достижения достаточно высокой степени стабилизации приходилось повторять такую тренировку 2–3 раза.

В конечном итоге в результате тренировки при давлениях $2 \cdot 10^{-8} < p < (5 - 7) \cdot 10^{-7}$ Торр на поверхности эмиттера формировалась практически однородная самовоспроизводящая структура из большого количества (приблизительно до 100) близких по размерам выступов. После продолжительной (5–10 h) работы эмиттера эмиссионная структура большей части его поверхности оставалась однородной, но формировалась узкая область с повышенной плотностью тока эмиссии вблизи зонной линии [110]. Иллюстрирует сказанное рис. 1, где показаны для сравнения эмиссионные изображения катода, полученные при приблизительно одинаковом токе $I = 5 \mu A$ и давлении $1 \cdot 10^{-7}$ Торр непосредственно после завершения тренировки (рис. 1, а) и после продолжи-

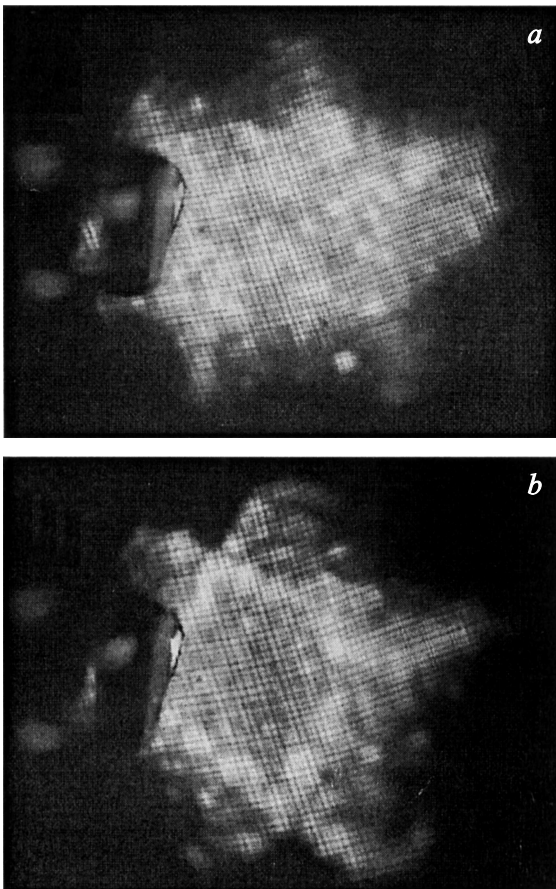


Рис. 1. Эмиссионные изображения катода, полученные при давлении $\sim 1 \cdot 10^{-7}$ Торр и приблизительно одинаковом токе $I = 5 \mu\text{A}$ непосредственно после окончания тренировки (*a*), а затем после продолжительной (около 5 h) работы эмиттера с отбором тока (*b*).

тельной работы эмиттера с отбором тока. После формирования эмиссионного изображения, типа показанного на рис. 1, *b*, в процессе дальнейшей работы эмиттера при повышенных давлениях $2 \cdot 10^{-8} < p < (5-7) \cdot 10^{-7}$ Торр распределение эмиссии по его поверхности практически не менялось.

Типичные токовые характеристики эмиттеров, измеренные в процессе их работы при повышенных давлениях $2 \cdot 10^{-8} < p < (5-7) \cdot 10^{-7}$ Торр, приведены на рис. 2, 3. На рис. 2 показаны изменения эмиссии во времени, полученные при близких по величине начальных токах $4-5 \mu\text{A}$ и разных давлениях. На рис. 3 показаны характеристики $I(t)$, измеренные при приблизительно одинаковом давлении в приборе и разных токах эмиссии.

Проведенные измерения свидетельствуют о возможности реализации механизма самовоспроизведения структуры фуллереновых покрытий при работе исследованных острых эмиттеров при типичных давлениях технического вакуума $2 \cdot 10^{-8} < p < (5-7) \cdot 10^{-7}$ Торр в широком интервале токов эмиссии приблизительно от $1.5-2$ до $10-20 \mu\text{A}$. Быстрые флуктуации токов

уменьшаются в процессе тренировки эмиттеров, но и после продолжительной их работы довольно велики и достигают $\sim 5-10\%$ от среднего значения тока эмиссии. Отмеченный уровень флуктуаций связан, видимо, с изменением во времени количества эмиссионных центров на поверхности исследованных острых катодов. Нам кажется, что уровень флуктуаций тока с многоострых структур с активированными фуллереновыми покрытиями должен быть существенно меньше.

Показанные на рис. 2, 3 демонстрационные характеристики измерялись в течение не очень продолжительного интервала времени $\sim 40-60$ min. Для опре-

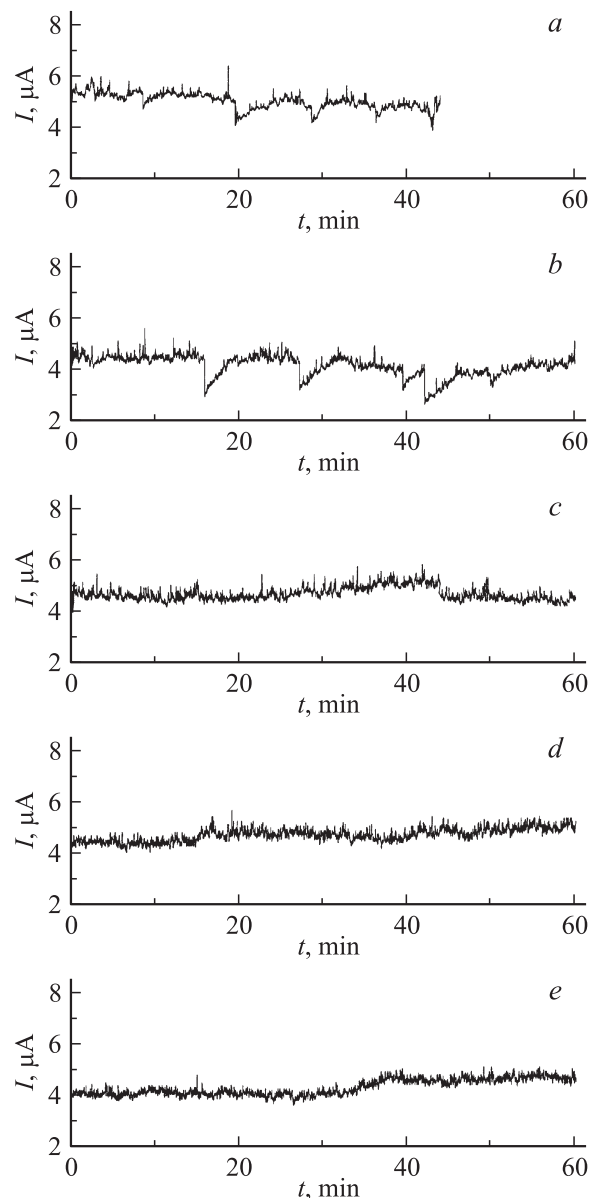


Рис. 2. Типичные зависимости эмиссионного тока I от времени работы t катода, полученные при разных давлениях p (Торр) в приборе: *a* — $2.4 \cdot 10^{-8}$, *b* — $4.9 \cdot 10^{-8}$, *c* — $1.1 \cdot 10^{-7}$, *d* — $3.1 \cdot 10^{-7}$, *e* — $5.6 \cdot 10^{-7}$. Характеристики $I(t)$ регистрировались при приблизительно одинаковых начальных токах $I = 4-5 \mu\text{A}$.

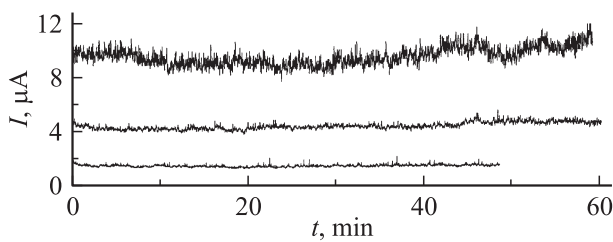


Рис. 3. Типичные зависимости эмиссионного тока I от времени работы t катода, измеренные при приблизительно одинаковом давлении в приборе $p \approx 3 \cdot 10^{-7}$ Торр и разных начальных токах эмиссии.

деления возможностей долговечной работы эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями проводились и более продолжительные измерения. В течение одного дня длительность измеряемых характеристик не превышала 2–3 h. Однако такие характеристики воспроизводились в течение приблизительно 3 month. Практическая неизменность получаемых характеристик свидетельствует, с нашей точки зрения, о возможностях долговременной работы исследованных эмиттеров с защитными фуллереновыми покрытиями, даже при малой (2 монослоя) толщине покрытия.

Заключение

Подводя итоги работы, приведем важнейшие ее результаты.

1. Исследована работа острых полевых эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в техническом вакууме $10^{-8} < p < 10^{-6}$ Торр.
2. Разработаны способы тренировки эмиттеров, обеспечивающие стабильную их работу в техническом вакууме.
3. Определены условия самовоспроизведения фуллереновых покрытий в условиях интенсивной ионной бомбардировки и продемонстрирована возможность долговечной их работы при давлениях $2 \cdot 10^{-8} < p < (5-7) \cdot 10^{-7}$ Торр в широком интервале отбираемых токов эмиссии $(1.5-2) < I < (10-20) \mu\text{A}$.

Проведенные исследования поддержаны грантом правительства по договору № 11.G34.31.0041 с Министерством образования и науки Российской Федерации, а также грантом РФФИ № 11-02-00425.

Список литературы

- [1] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 3. С. 17–54.
- [2] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Ефремов А.А., Поляков А.С. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 105–110.
- [3] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Бондаренко А.К., Веселов А.А., Светлов И.А. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 81–84.
- [4] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А., Морозов А.Н. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 11. С. 119–122.

- [5] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А., Пантелеев И.С. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 1. С. 114–119.
- [6] Spindt C.A., Holand C.E., Schwoebel P.R., Brodie I. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1998. Vol. 16. P. 758.
- [7] Whaley D.R., Gannon B., Smith C.R. et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2000. Vol. 28. N 3. P. 727.
- [8] Whaley D.R. et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2002. Vol. 30. N 3. P. 998.
- [9] Елецкий А.В. // УФН. 2010. Т. 180. № 9. С. 897–930.