

13.2

Анализ поведения индивидуальных эмиссионных центров на поверхности многоострийного полевого катода

© А.Г. Колосько, Е.О. Попов, С.В. Филиппов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: agkolosko@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 13 декабря 2018 г.

Принято к публикации 20 декабря 2018 г.

Представлена методика анализа поверхности многоострийных полевых катодов на основе данных компьютеризированного полевого эмиссионного проектора и системы быстрого сканирования высоким напряжением. Результаты исследований нанокompозитного эмиттера полимер/углеродные нанотрубки позволили получить распределение эмиссионных центров по поверхности катода, а также оценить изменение работы выхода отдельных эмиссионных центров при разных уровнях приложенного напряжения. Проведена численная оценка вклада отдельных групп эмиссионных центров в изменение формы вольт-амперной характеристики.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47504.17643

Полевые эмиттеры являются ярким примером применения квантовых эффектов в современной электронике [1]. Использование в качестве полевого эмиттера материалов с нано- и микроструктурированной поверхностью позволяет существенно повысить предел достижимых токов, а также стабильность работы эмиттера [2]. Однако стохастическое взаимодействие нано- и микроострий на его поверхности с заряженными и нейтральными частицами остаточной атмосферы приводит к труднопрогнозируемому поведению системы в условиях технического вакуума ($\sim 10^{-7}$ Торр). Поэтому множество научных работ направлено на изучение адсорбционно-десорбционных процессов на поверхности полевых эмиттеров и влияния этих процессов на макроскопические характеристики, такие как вольт-амперная характеристика (ВАХ) и временная стабильность эмиссионного тока. Самым эффективным инструментом для наблюдения изменения свойств поверхности эмиттера в ходе его работы является полевой эмиссионный проектор с люминесцентным экраном и цифровой видеокамерой, который регистрирует распределение тока на поверхности эмиттера в виде пятнистых картин свечения [3].

Можно выделить общие закономерности взаимодействия многоострийных эмиттеров с частицами остаточной атмосферы. В работе [4] наблюдалось стохастическое изменение картины свечения эмиттера, состоящего из графеновых волокон на кремниевой подложке. Серия картин, полученная в ходе длительной работы эмиттера (~ 3 h) при постоянном напряжении, показала, что в целом распределение центров на поверхности не меняется, но наблюдается изменение их числа, а некоторые центры меняют свое положение и уровень тока. Эти флуктуации объяснялись бомбардировкой центров ионами остаточной атмосферы. Изменение же уровня напряжения

приводило к увеличению числа эмиссионных центров и увеличению яркости общей картины. В работе [5] было исследовано влияние уровня вакуума на полевую эмиссию графеновых нано пленок. Ухудшение вакуумных условий на картинах свечения приводило к уменьшению концентрации эмиссионных центров, а при улучшении они частично восстанавливались. Это изменение объяснялось адсорбцией на центры эмиссии атомов кислорода, которые увеличивают работу выхода электронов. В [6] была изучена поверхность нанокompозита с углеродными нанотрубками (УНТ). На увеличенном изображении отдельных УНТ наблюдались светящиеся пятна, которые авторы связали с адсорбированными частицами, которые локально улучшают полевую эмиссию. При нагреве до 900 К мерцание и перемещение светящихся пятен на общей картине свечения прекращалось. При охлаждении же катода адсорбаты вновь заполняли поверхность нанокompозита. Время возврата эмиттера в исходное состояние при резком охлаждении до 300 К составляло ~ 1 min при давлении 10^{-8} Торр.

Цель настоящей работы состоит в получении эмиссионного профиля полевого эмиттера новым методом компьютерной обработки картин свечения, а также в изучении связи макроскопических характеристик эмиттера с локальными изменениями работы выхода отдельных эмиссионных центров на его поверхности.

Экспериментальный стенд состоит из компьютеризированной установки, которая позволяет регистрировать и обрабатывать в режиме онлайн вольт-амперные характеристики полевых эмиттеров [7]. ВАХ получают в режиме быстрого сканирования: полусинусоидальный импульс амплитудой $U_m \sim 1$ kV дает одну ВАХ каждые 20 ms. Также стенд включает в себя полевую эмиссионный проектор с онлайн обработкой картин свечения [8]. Уровень вакуума в измерительной камере

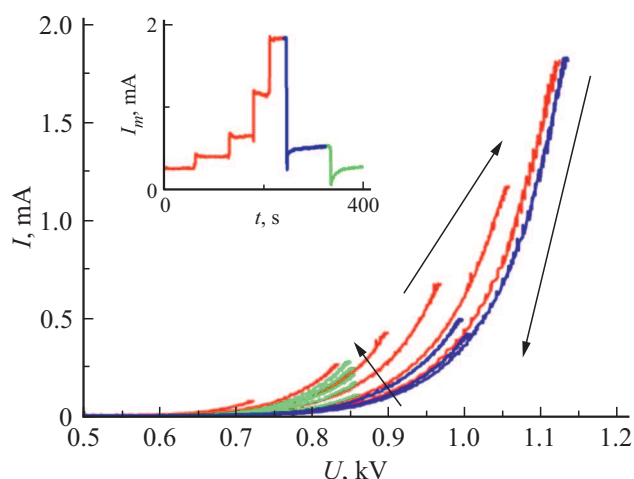


Рис. 1. Изменение формы ВАХ полевого катода при росте, падении и постоянном уровне амплитуды импульсов напряжения U_m . На вставке показано изменение амплитуды импульсов эмиссионного тока I_m со временем.

поддерживается на уровне $\sim 10^{-7}$ Торг. Межэлектродное расстояние (расстояние между поверхностью металлической подложки эмиттера и люминофорным экраном) устанавливалось равным $170 \mu\text{m}$.

Исследованный образец представлял собой нанокompозит полимер/одностенные УНТ, который был изготовлен методом вращающегося столика из суспензии полимер-УНТ-о-ксилол. Данный вид эмиттеров имеет определенные преимущества перед эмиттерами из нанотрубок без полимерной матрицы [9].

Методика анализа картин свечения с получением гистограммы максимальных токов локальных эмиссионных центров, а также гистограммы соответствующих коэффициентов усиления поля была подробно описана в работах [10,11]. Она реализуется в несколько этапов: 1) сбор координат и размеров зон флуктуации эмиссионных центров методом поиска точек максимальной яркости на картинах свечения — порядка 100 s до выхода на уровень насыщения числа найденных центров; 2) слежение за яркостью найденных зон — порядка 100 s до выхода на уровень насыщения суммарной максимальной яркости; 3) получение значений локальных токов путем распределения измеряемого тока (амплитуды импульсов I_m) по эмиссионным центрам в пропорции к их яркости; 4) расчет коэффициентов усиления поля центров β по их максимальным локальным токам методом численного решения уравнения Фаулера-Нордгейма при заданных работе выхода ϕ (была выбрана равной 4.6 eV, что соответствует состоянию нанотрубки без адсорбатов [12]) и площади эмиссии каждого центра S_0 (была выбрана равной 5 nm^2 , что соответствует компьютерным расчетам [13]). Для анализа и сравнения получаемых распределений нами была написана отдельная программа.

На рис. 1 представлено поведение ВАХ при ступенчатом росте и падении амплитуды импульсов напряжения U_m . С ростом U_m ВАХ смещается в сторону меньших токов, что указывает на изменение адсорбционно-десорбционного баланса в сторону ухудшения эмиссионной способности центров, которое может быть связано с электронно-стимулированной десорбцией частиц CO_2 с поверхности анода [14]. Уменьшение U_m приводит к уменьшению ВАХ без изменения положения, т.е. десорбция частиц с поверхности эмиттера происходит не сразу. Последующая выдержка при низких U_m приводит к плавному росту эмиссионного тока со временем. Это может быть объяснено изменением работы выхода эмиссионных центров в результате десорбции с них частиц CO_2 . При циклическом изменении напряжения форма ВАХ меняется также циклически, что исключает существенное влияние деструктивных процессов на поверхность эмиттера.

На рис. 2 представлена зависимость от времени уровня тока I_m при ступенчатом уменьшении, а затем росте U_m . Суммарная яркость центров эмиссии, зарегистрированных полевым проектором, линейно зависит от уровня тока, что позволяет использовать ее для расчета локальных эмиссионных токов и последующего вычисления коэффициентов усиления поля β . Полученные для каждой ступени напряжения гистограммы представлены на рис. 3, а. Диапазоны значений β у рассчитанных гистограмм с хорошей точностью совпали почти для всех ступеней напряжения. Однако гистограмма самой нижней ступени показала завышенные значения. Поскольку физически коэффициент усиления поля обусловлен формой поверхности катода, завышенные значения β , скорее всего, связаны с уменьшением работы выхода части эмиссионных центров. Анализ отдельных центров показал, что уменьшение это составляет $\sim 0.3 \text{ eV}$, что соответствует литературным данным, описывающим влияние адсорбатов CO_2 [15]. Исходя из последнего

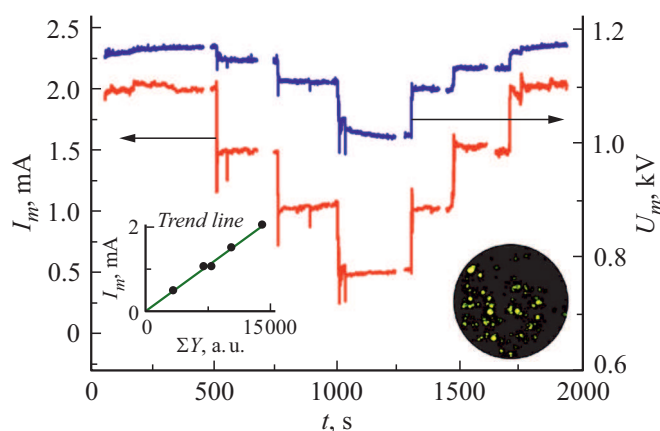


Рис. 2. Зависимость амплитуды импульсов эмиссионного тока I_m и амплитуды импульсов приложенного напряжения U_m от времени. На вставках показаны картина свечения, зарегистрированная при $I_m = 2 \text{ mA}$ (справа) и зависимость уровня тока от суммарной яркости центров (слева).

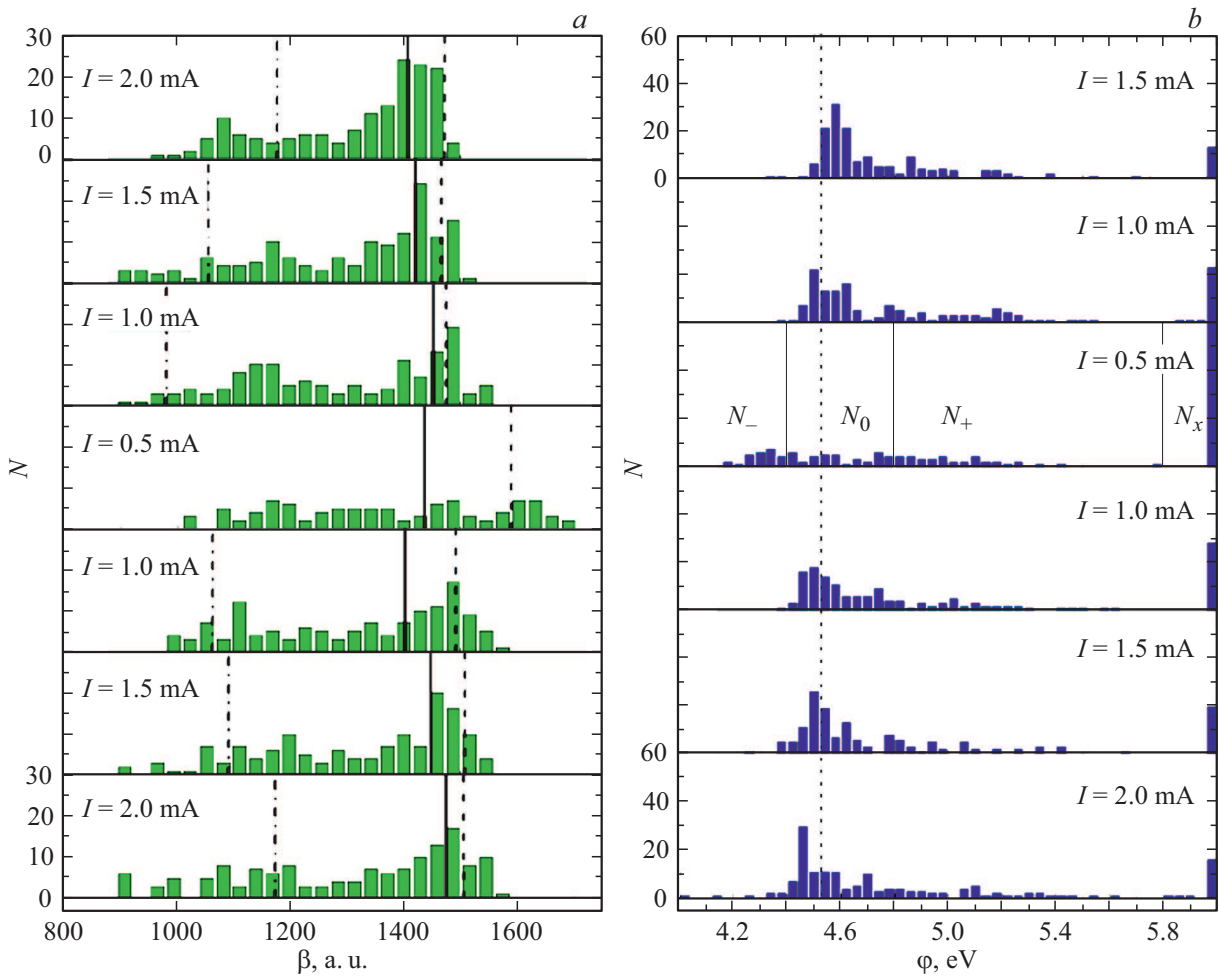


Рис. 3. Гистограммы характеристик эмиссионных центров при разных уровнях тока: *a* — коэффициента усиления поля β ; *b* — работы выхода ϕ . Вертикальными линиями отмечены значения β для различных представителей групп: самых ярких центров эмиссии (штриховая), самых стабильных (сплошная) и интенсивно гаснущих (штрихпунктирная). Пунктиром показано исходное значение работы выхода (4.6 eV для центров первой ступени). Всего центров в анализе 160.

предположения мы фиксировали коэффициенты β , полученные на ступени с максимальным U_m , и анализировали соответствующее изменение ϕ эмиссионных центров при других уровнях напряжения (рис. 3, *b*).

У части центров при изменении U_m работа выхода оставалась постоянной ($\phi = 4.6 \pm 0.2$ eV). Доля таких центров на ступени с минимальным U_m составила $N_0/N = 24\%$, а их относительный вклад в общий ток ступени с максимальным U_m — $I_0/I = 31\%$. Работа выхода ϕ других центров уменьшилась (< 4.4 eV), их доля $N_-/N = 16\%$, а вклад в общий ток $I_-/I = 28\%$. Для третьей группы значение ϕ увеличилось (> 4.8 eV), в этом случае $N_+/N = 23\%$ и $I_+/I = 24\%$. Остальные центры вышли из процесса эмиссии, уменьшив свою яркость ниже порога регистрации: $N_x/N = 28\%$ и $I_x/I = 17\%$. Скачкообразное уменьшение работы выхода некоторых центров от ступени к ступени, возможно, связано с недостаточно высоким разрешением USB-микроскопа ($\sim 15 \mu\text{m}$ на пиксель) и наложением области свечения нескольких центров друг на друга, так что

в одном зарегистрированном центре могло оказаться несколько отдельных микроскопических источников эмиссии. Их поочередное покрытие адсорбатами могло привести к переключению внимания программы с одного пика яркости на другой.

Отметим, что уменьшение работы выхода происходит в основном у центров с наибольшими β , тогда как центры с наименьшими β , наоборот, стремятся увеличить свою работу выхода ϕ . Такая сепарация может быть связана с тем, что центры с наибольшими β испытывают повышенную токовую нагрузку и достаточно сильно разогреты для освобождения от адсорбатов. В то время как „слабые“ эмиссионные центры, наоборот, подвержены осаждению на них дополнительных частиц при пониженных токах.

Основной вклад в увеличение тока эмиссии ($+430 \mu\text{A}$) относительно уровня, ожидаемого при понижении напряжения, вносят самые яркие центры, однако им в противовес уменьшает ток ($-380 \mu\text{A}$) значительное количество тусклых центров. Таким образом, за фор-

мирование новой ВАХ отвечает весь ансамбль эмиссионных центров, перестраиваясь под воздействием нового адсорбционно-десорбционного баланса. Отметим, что величина стартовой φ (4.6 eV) почти не влияет на вид гистограмм, т.е. изменение работы выхода центров на ~ 0.3 eV не зависит от выбранной модели: десорбция CO_2 при понижении напряжения или, например, адсорбция H_2 либо H_2O .

Проведенный анализ показал возможность оценки изменения работы выхода отдельных центров эмиссии и определения их вклада в изменение макроскопического уровня эмиссионного тока, который определяет форму ВАХ. Возможность одновременного изучения свойств множества отдельных эмиссионных центров и построение их общей статистики открывает новые возможности для проверки теории полевой эмиссии, а также для моделирования макроскопических свойств катода на основе кратковременных измерений.

Список литературы

- [1] *Егоров Н.В., Шешин Е.П.* Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 703 с.
- [2] *Соминский Г.Г., Тумарева Т.А.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. Т. 23. № 2. С. 74–93.
- [3] *Baturin S.S., Baryshev S.V.* // Rev. Sci. Instr. 2017. V. 88. N 3. P. 033701.
- [4] *Khare R., Shinde D.B., Bansode S., More M.A., Majumder M., Pillai V.K., Late D.J.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. N 2. P. 023111.
- [5] *Васильева Е.А., Клещ В.И., Образцов А.Н.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 7. С. 107–111.
- [6] *Dean K.A., Chalamala B.R.* // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. N 7. P. 3832–3836.
- [7] *Попов Е.О., Колосько А.Г., Филиппов С.В., Романов П.А., Федичкин И.Л.* // Наноматериалы и наноструктуры — XXI век. 2016. № 1. С. 14–26.
- [8] *Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A., Fedichkin I.L.* // Mater. Today. Proc. 2018. V. 5. N 5. Pt 3. P. 13800–13806.
- [9] *Pandey A., Prasad A., Moscatello J.P., Engelhard M., Wang C., Yap Y.K.* // ACS Nano. 2013. V. 7. N 1. P. 117–125.
- [10] *Filippov S.V., Popov E.O., Kolosko A.G., Vinnichuk R.N.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 917. N 9. P. 092022.
- [11] *Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Terukov E.I.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2018. V. 36. N 2. P. 02C106.
- [12] *Gao R., Pan Z., Wang Z.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. N 12. P. 1757–1759.
- [13] *Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G., Romanov P.A.* // Int. Vac. Nanoelectron. Conf. Techn. Digest. Kyoto, Japan: 2018. P. 256.
- [14] *Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A., Terukov E.I., Shchegolkov A.V., Tkachev A.G.* // Appl. Surf. Sci. 2017. V. 424. Pt 2. P. 239–244.
- [15] *Strasser G., Bertel E., Netzer F.P.* // J. Catal. 1983. V. 79. N 2. P. 420–430.