

12.1;13.2

## Оптимизация тренировки полевых катодов высоким напряжением на основании данных полевого проектора

© 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 28 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 5 мая 2022 г.

Принято к публикации 5 июля 2022 г.

Описана методика тренировки многоострижных полевых катодов высоким напряжением, позволяющая на основании данных полевого проектора оптимизировать эмиссионный ток. Предложен алгоритм получения и анализа экспериментальных данных, который позволяет проводить управляемую тренировку поверхности катода, а также представлены результаты анализа экспериментальных данных, полученных для перспективной нанокompозитной структуры „углеродные нанотрубки в полистироле“.

**Ключевые слова:** полевая эмиссия, многоострижные полевые катоды, тренировка катода высоким напряжением, полевой эмиссионный проектор, оптимизация эмиссионных свойств катода.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.16.53206.19181

Оптимизация поверхности полевого эмиттера для получения максимальных по величине и стабильности эмиссионных токов является одной из первых задач развития современной вакуумной наноэлектроники. Основными параметрами, которые необходимо улучшать при решении этой задачи, являются равномерность расположения эмиссионных центров по поверхности катода с уменьшением эффекта их взаимной экранировки, равномерность распределения центров по высотам, форме и работе выхода поверхности, увеличение аспектного отношения центров в совокупности с повышением термической стойкости за счет подбора материалов и оптимизации теплоотвода, улучшение адгезии центров к поверхности подложки и т.п. Методы воздействия на поверхность уже созданной эмиссионной структуры с целью оптимизации указанных выше параметров также различны. Это может быть воздействие высокими температурами с целью очистки поверхности от адсорбатов, управляемая ионная бомбардировка с целью очистки поверхности и уничтожения наиболее высоких и нестабильных центров, лазерная обработка с целью выравнивания центров по высоте, покрытие центров дополнительными материалами, уменьшающими работу выхода и повышающими термостойкость, включая нанесение наночастиц, повышающих аспектное отношение и соответственно токоотдачу. Самым же доступным и распространенным является воздействие на эмиттер высоких напряжений, которые, в частности, прикладываются для получения эмиссионного тока.

Высокое напряжение может вызвать удаление с поверхности катода самых высоких и слабо прикрепленных к подложке эмиссионных центров за счет тянущих ponderomotorных сил. Эти же силы могут очищать поверхность катода от адсорбатов и микрочастиц. Появление эмиссионного тока может вызвать разогрев отдельных,

наиболее высоких центров и их самоуничтожение за счет термического взрыва их вершин. Эмиссионный ток может также приводить к ионизации частиц остаточной атмосферы в межэлектродном промежутке и появлению ионной бомбардировки, которая также может как очищать, так и уничтожать высокие эмиссионные центры. Первые измерения эмиссионного тока для свежего, еще не подвергавшегося воздействию высоких полей эмиттера, как правило, приводят к изменению его поверхности под действием внезапных вакуумных разрядов, которые сопровождаются уничтожением нестабильных эмиссионных центров, а также активацией новых центров (так называемая тренировка катода).

Примером воздействия высокого напряжения на поверхность катода являются результаты исследований, проведенных с массивами углеродных нанотрубок (УНТ) [1–5].

В работе [1] были исследованы массивы многостенных УНТ, выращенных методом CVD (chemical vapor deposition) с катализатором на металлической подложке. С помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) оценивалась статистика разброса УНТ по высотам до и после обработки постоянным эмиссионным током. С ростом уровня тока обработки максимальная высота в распределении УНТ падала. Построена теория термического баланса УНТ, где к уничтожению эмиссионного центра ведет либо термический взрыв вершины УНТ, либо расплав контакта между УНТ и подложкой. Теоретически показано, что с ростом высоты УНТ критическая плотность тока для расплава контакта уменьшается, а начиная с некоторой высоты над расплавом контакта превалирует взрыв вершины УНТ.

В [2] также была изучена „планаризация“ поверхности катода из вертикально ориентированных УНТ контролируемым вакуумным разрядом (так называемый метод

$\mu$ EDM — micro-electro-discharge machining). Обработка повысила равномерность высот УНТ на несколько порядков.

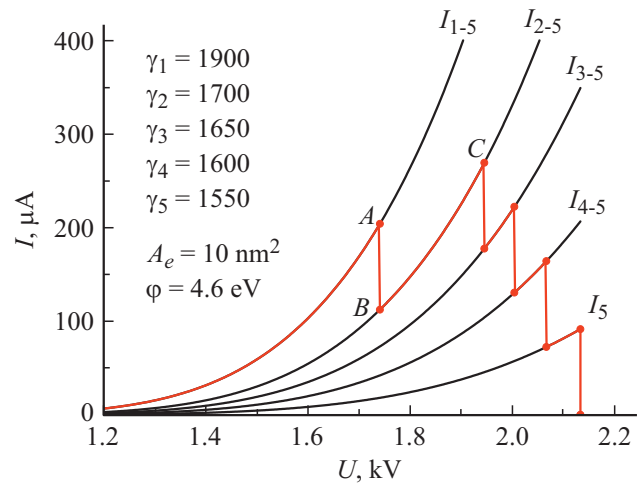
Применение полевого проектора с люминофорным покрытием на прозрачном аноде (методика IMLS — integral measurement system with luminescent screen) позволяет получать информацию о распределении эмиссионных центров и наблюдать за их изменением (фактически поштучным уничтожением) в результате тренировки поверхности.

Так, с помощью IMLS был изучен процесс тренировки эмиттеров в виде волокон, сплетенных из углеродных нанотрубок, при этом наблюдался существенный рост площади эмиссии и коэффициента усиления поля [3].

Аналогичным образом было изучено изменение массива УНТ, выращенных методом MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition) на пористом алюминии [4]. Было получено соотношение числа мерцающих эмиссионных центров (дающих флуктуации эмиссионного тока с характеристиками фликкер-шума), числа стабильных центров, числа уничтожающихся и числа активирующихся. Длительная обработка высоким напряжением (ток  $\sim 250 \mu\text{A}$  в течение 2 h) увеличила число эмиссионных центров почти в 2 раза. В то же время общий эмиссионный ток в течение всего тайм-теста экспоненциально падал, так что уменьшился почти в 1.5 раза (при давлении остаточной атмосферы  $10^{-6}$  mbar). Увеличение давления остаточного газа в камере приводит к усилению эффекта ионной бомбардировки и еще большему падению тока вплоть до полного уничтожения центров. В работе указано, что комбинация методов подачи высокого напряжения с регистрацией вольт-амперных характеристик (ВАХ) и IMLS позволяет оптимизировать поверхность многоострийного полевого катода.

В работе [5] с помощью IMLS исследовалось влияние высоких токов на регулярный массив островков с УНТ, полученный методом трафаретной печати (в качестве пасты-биндера была использована суспензия из наночастиц ZnO со средним диаметром 30 nm, замешанных в раствор целлюлозы в терпинеоле). Обработка высокими эмиссионными токами привела к увеличению равномерности картины распределения эмиссионных центров по току за счет уничтожения отдельных выступающих УНТ, которые экранировали остальные УНТ в своих островках. При этом общий уровень тока упал и ВАХ стала ниже, однако возросло предельное напряжение, достижимое без возникновения вакуумных разрядов.

Опыты Деккера [6] показали, что УНТ ведет себя как нанопроволока с предельной плотностью тока  $10^9 \text{ A/cm}^2$ , выше которой при комнатной температуре УНТ разрушается. На основе результатов подобных работ, которые были посвящены исследованию одноострийных вольфрамовых и молибденовых эмиттеров, был создан тест на полевою эмиссию (так называемый тест Форбса) [7]. Тест позволяет определить по экспериментальной ВАХ полевого катода предельно допустимые напряжения. Если зарегистрированные в эксперименте напряжения



**Рис. 1.** ВАХ модельного эмиттера, состоящего из пяти эмиссионных центров: с ростом напряжения центры по очереди уничтожаются и уровень тока резко уменьшается. Монотонные кривые с индексами  $I_{i-5}$  отвечают суммарным ВАХ соответствующих подгрупп эмиссионных центров.

превышают предельные, это значит, что эксперимент вышел за рамки полевой эмиссии.

Целью настоящей работы является описание алгоритма оптимизации поверхности многоострийного полевого катода путем подачи высокого напряжения. Основной идеей оптимизации является определение соотношения между увеличением стабильности эмиттера за счет уничтожения высоких центров и падением общего эмиссионного тока в результате того же процесса.

Чтобы проиллюстрировать ожидаемый эффект оптимизации, была создана модель полевого эмиттера из нескольких центров эмиссии с параметрами, близкими к параметрам одностенных УНТ реальных многоострийных катодов [8]. На рис. 1 представлена расчетная ВАХ.

Площадь эмиссии каждого центра была задана равной  $A_e = 10 \text{ nm}^2$ , работа выхода  $\phi = 4.6 \text{ eV}$ , коэффициенты усиления поля приняты равными  $\gamma = 1550, 1600, 1650, 1700, 1900$ . Для расчета плотности эмиссионного тока каждого центра была использована формула Фаулера–Нордгейма в приближении Елинсона–Шредника [9]:

$$J = (a_{\text{FN}}/1.1)\phi^{-1}F_R^2 f^2 \exp(1.03\eta) \exp(-0.95\eta/f). \quad (1)$$

Здесь  $J$  — плотность тока [ $\text{A/m}^2$ ],  $\phi$  — работа выхода поверхности эмиттера [ $\text{eV}$ ],  $F$  — электрическое поле на поверхности,  $f = F/F_R$  — безразмерное поле, связанное с полем снятия потенциального барьера  $F_R = \phi^2 c_S^{-2}$ , где  $c_S^2 = 1.44 \cdot 10^{-9} \text{ eV}^2 \cdot \text{m/V}$  — константа Шоттки,  $\eta(\phi) = b_{\text{FN}}\phi^{3/2}/F_R = b_{\text{FN}}c_S^2\phi^{-1/2}$ ,  $a_{\text{FN}} = 1.54 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{eV} \cdot \text{V}^{-2}$  и  $b_{\text{FN}} = 6.83 \cdot 10^9 \text{ eV}^{-3/2} \cdot \text{V/m}$  — первая и вторая константы Фаулера–Нордгейма.

В случае плоскопараллельных электродов, когда межэлектродное расстояние много больше высоты эмис-

сионного центра, поле  $F$  связывается с приложенным напряжением по формуле

$$F = \gamma U / d_{A-C}, \quad (2)$$

где межэлектродное расстояние  $d_{A-C} = 300 \mu\text{m}$ .

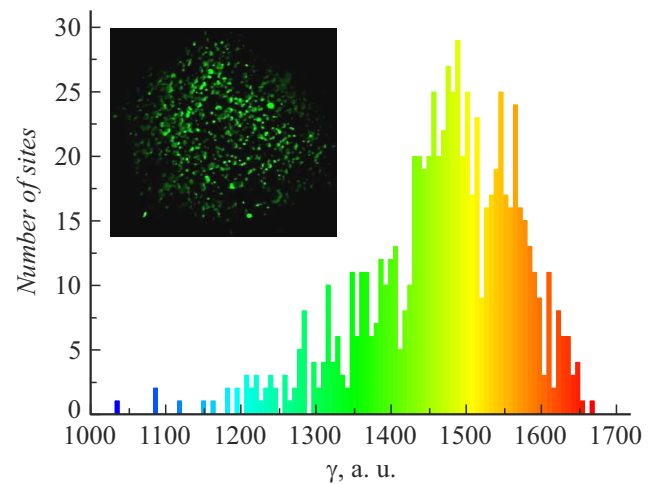
Полный ток  $I$  получался умножением плотности тока на площадь эмиссии:

$$I = JA_e. \quad (3)$$

Предельная плотность тока была получена из данных исследования Форбса [7]:  $J_{\text{max}} = 9.2 \cdot 10^8 \text{ A/cm}^2$  (соответствует полю  $f = 0.75$ ).

Видно, что с ростом уровня напряжения ток достигает такого уровня, когда уничтожается первый, самый высокий центр (точка  $A$ ). В результате полный ток теряет его вклад, и ВАХ меняет свою форму на ВАХ эмиттера из четырех центров (точка  $B$ ). Затем уничтожается второй центр, и ВАХ снова меняется (точка  $C$ ), и т.д. Из полученного графика видно, что уничтожение самых высоких центров приводит к росту доступного диапазона напряжений и соответственно к росту максимального тока. Однако начиная с какого-то эмиссионного центра (точка  $C$ ) этот рост прекращается и начинается падение общего тока, связанное с уменьшением общей токоотдачи эмиттера. Анализ показывает, что для существования такого пика на „елкоподобной“ ВАХ необходимо, чтобы вначале при уничтожении центров наблюдался рост общего тока с ростом напряжения. Такой рост возможен, если падение тока за счет сгорания одного центра (разница токов в точках  $A$  и  $B$ ) оказывается меньше, чем рост тока при увеличении напряжения от порогового напряжения этого центра до порогового напряжения следующего (разница токов в точках  $C$  и  $B$ ). Это возможно только при достаточно большой разнице коэффициентов усиления поля центров (соседних в распределении).

Для проверки наличия такого оптимума в эксперименте мы использовали данные исследования полевого катода на основе нанокompозита „одностенные УНТ в полистироле“. Исследование проводилось на компьютеризированной установке многоканального сбора и онлайн-обработки данных [8]. Установка оснащена полевым проектором, системой быстрого сканирования высоким напряжением и программой, позволяющей получать из наблюдаемых на люминофоре картин свечения данные о расположении и величине токовой нагрузки отдельных микроскопических эмиссионных центров. Токовая нагрузка получается путем распределения макроскопического регистрируемого тока по центрам согласно их локальной яркости. Соответствующий коэффициент усиления поля находится численным решением уравнения Фаулера–Нордгейма (1) со следующими общими параметрами: межэлектродное расстояние  $d_{A-C} = 370 \mu\text{m}$ , работа выхода УНТ  $\phi = 4.6 \text{ eV}$ , площадь эмиссии  $A_e = 10 \text{ nm}^2$ . Площадь эмиссии была задана как средняя оценка  $A_e = A_{eff} / N$ ,



**Рис. 2.** Гистограмма значений коэффициента усиления поля отдельных эмиссионных центров полевого катода, полученных обработкой картин свечения в режиме онлайн. На вставке представлена фотография мгновенной картины свечения.

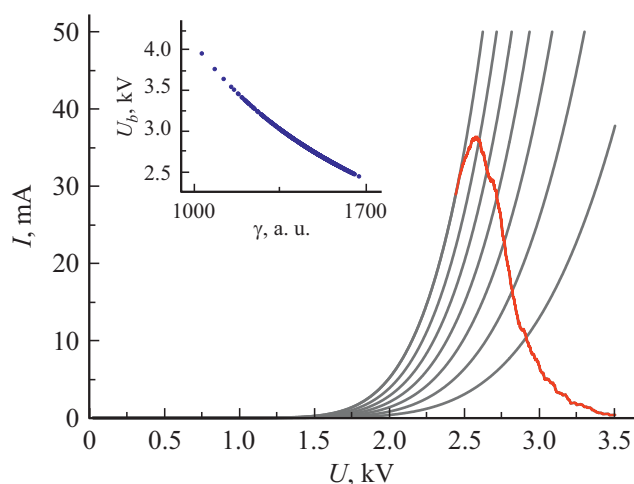
где  $A_{eff} = 7577 \text{ nm}^2$  — эффективная площадь эмиссии, полученная путем построения линии тренда к ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма [9],  $N = 767$  — число эмиссионных центров, зарегистрированных с помощью полевого проектора. В дополнение по данным СЭМ радиус закругления вершин УНТ опытного образца составляет 2–4 nm, что находится в хорошем согласии с площадью эмиссии  $A_e$ .

На рис. 2 представлены полученные экспериментальные данные: гистограмма распределения центров по коэффициенту усиления поля  $\gamma$ , а также картина свечения полевого проектора.

Отметим, что распределение центров эмиссии по коэффициенту усиления поля в принципе может быть получено не только с помощью полевого проектора, но и с помощью других методик, например SAFEM (scanning anode field emission microscope) [10].

Соответствующие предельной плотности тока  $J_{\text{max}}$  напряжения уничтожения центров  $U_b$  рассчитывались по полученным выше экспериментальным данным путем численного решения уравнения Фаулера–Нордгейма (1):  $U_b = 2.44\text{--}3.96 \text{ kV}$ , т.е. при 2.44 kV ожидается уничтожение первого, самого высокого центра эмиссии, а при 3.96 kV не должно остаться ни одного из зарегистрированных центров.

На рис. 3 представлен результат анализа влияния на форму ВАХ процесса уничтожения центров высоким напряжением. Монотонные кривые — это ВАХ сумм самых низких центров с разницей в 100 центров. Ломаная ВАХ — результат поочередного уничтожения эмиссионных центров (на вставке показана зависимость напряжения уничтожения каждого центра от его коэффициента усиления поля). На графике наблюдается четкий максимум при  $U = 2.58 \text{ kV}$ . Это напряжение, до которого имеет смысл проводить тренировку катода.



**Рис. 3.** Поведение уровня эмиссионного тока с ростом уровня напряжения при условии поочередного уничтожения центров эмиссии. Монотонными кривыми представлены суммарные ВАХ соответствующих подгрупп, построенные через каждые 100 уничтоженных центров. На вставке показана зависимость напряжения уничтожения центра от его коэффициента усиления поля.

При этом самоуничтожается  $\sim 80$  самых высоких и нестабильных центров эмиссии, а ток достигает максимального возможного значения 36.4 мА. Превышение этого напряжения должно приводить к деградации эмиттера и потере его общей токовой нагрузки.

В представленных выше расчетах не учитывается возможность изменения площади эмиссии отдельных эмиссионных центров с ростом напряжения, а также зависимость этой площади от коэффициента усиления поля. Эти зависимости довольно сложны и являются предметом дальнейших исследований.

Отметим также, что с ростом напряжения возможно образование новых эмиссионных центров (в результате термического взрыва на поверхности катода, или эффекта самозаточки острий, или изменения условия взаимной экранировки при уничтожении высокого эмиссионного центра и т.п.). Однако, как правило, новые эмиссионные центры не превышают по коэффициенту усиления поля те, которые были уничтожены высоким напряжением до их появления, так что тенденция построенных выше зависимостей сохраняется.

В заключение отметим, что методика управляемой тренировки катода может быть применена не только для воздействия на катод высоким напряжением, но и для других видов технологической обработки его поверхности.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] X.H. Liang, S.Z. Deng, N.S. Xu, J. Chen, N.Y. Huang, J.C. She, *J. Appl. Phys.*, **101** (6), 063309 (2007). DOI: 10.1063/1.2437106
- [2] M.O. Hassan, A. Nojeh, K. Takahata, *ACS Appl. Nano Mater.*, **2** (7), 4594 (2019). DOI: 10.1021/acsnm.9b00948
- [3] T.Y. Posos, S.B. Fairchild, J. Park, S.V. Baryshev, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **38** (2), 024006 (2020). DOI: 10.1116/1.5140602
- [4] D. Lysenkov, G. Müller, *Int. J. Nanotechnol.*, **2** (3), 239 (2005). DOI: 10.1504/IJNT.2005.008062
- [5] G. Zhang, J. Chen, S.Z. Deng, J.C. She, N.S. Xu, *Ultramicroscopy*, **109** (5), 385 (2009). DOI: 10.1016/j.ultramic.2008.11.002
- [6] C. Dekker, *Phys. Today*, **52** (5), 22 (1999). DOI: 10.1063/1.882658
- [7] R.G. Forbes, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **469** (2158), 20130271 (2013). DOI: 10.1098/rspa.2013.0271
- [8] A.G. Kolosko, S.V. Filippov, E.O. Popov, S.A. Ponyaev, A.V. Shchegolkov, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **38** (4), 043203 (2020). DOI: 10.1116/6.0000072.
- [9] Е.О. Попов, А.Г. Колосько, С.В. Филиппов, *Письма в ЖТФ*, **46** (17), 6 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.17.49884.18373 [E.O. Popov, A.G. Kolosko, S.V. Filippov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (9), 838 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020090096].
- [10] M.T. Cole, K.B.K. Teo, O. Groening, L. Gangloff, P. Legagneux, W.I. Milne, *Sci. Rep.*, **4** (1), 4840 (2014). DOI: 10.1038/srep04840