

13

Планарная наноструктура с полевой эмиссией пленки алмазоподобного углерода для построения низковольтного катода с развитой поверхностью

© Н.П. Абаньшин¹, Ю.А. Аветисян², Г.Г. Акчурин^{2,3},
А.П. Логинов¹, С.П. Морев^{4,5}, Д.С. Мосияш¹, А.Н. Якунин²

¹ ООО „Волга-Свет“, Саратов

² Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

³ НИУ „Саратовский государственный университет“, Саратов

⁴ НПП „Торий“, Москва

⁵ Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва

E-mail: anyakunin@mail.ru

Поступило в Редакцию 6 января 2016 г.

Обсуждаются вопросы эффективного решения проблем, связанных с разработкой долговечных низковольтных автоэмиссионных катодов с развитой рабочей поверхностью и высокой плотностью тока полевой эмиссии. Приведены результаты практической реализации концепции многоэлектродных планарных наноструктур на основе полевой эмиссии пленки алмазоподобного углерода. Высокая средняя плотность тока $0.1\text{--}0.3\text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ обеспечивается формированием контролируемой зоны локализации поля лезвийной структуры. Достигнутая долговечность образцов катода на уровне $700\text{--}3000\text{ ч}$ обусловлена положительным влиянием ряда факторов, включая стабилизирующие свойства алмазоподобной углеродной пленки, защиту эмиттера от ионной бомбардировки, использование системы балластных сопротивлений, а также низковольтность за счет субмикронных межэлектродных зазоров.

Активно ведущиеся исследования полевой эмиссии наноразмерных структур [1–3], в том числе углеродных, объясняются значимостью ожидаемых преимуществ от использования источников тока на основе автоэлектронной эмиссии по сравнению с традиционными термоэлектронными катодами. Время готовности автоэмиссионных катодов на много порядков ниже и определяется практически лишь временем

подачи управляющих потенциалов. Это во многих случаях обещает существенно повысить рабочий ресурс современных электровакуумных приборов.

Вместе с тем разработка источников тока на полевой эмиссии связана с необходимостью решения целого ряда проблем, которые ограничивают достижение приемлемых уровней как средней плотности тока, так и интегрального тока, затрудняют обеспечение стабильной эмиссионной способности катода в течение нескольких тысяч часов.

В числе таких проблем называются экранировка соседних элементарных центров эмиссии в случае использования массивов нанотрубок [4], бомбардировка сфокусированным потоком ускоренных ионов молекул остаточной атмосферы для классических острых структур Спиндта [5,6] и массивов нанотрубок [4], снижение эмиссионной способности вследствие адсорбции и десорбции различных молекулярных компонентов с эмитирующей поверхности [7]. Однако основной причиной разрушения элементарных центров эмиссии является существенная нелинейность физических процессов, сопровождающих транспорт электронов в интенсивных полях из эмиттера в вакуум. Результатом сочетания флуктуаций параметров физических, химических и морфологических свойств материала, а также приложенного внешнего электростатического поля является спонтанный переход из режима автоэлектронной эмиссии в режим неуправляемой взрывной эмиссии [8]. Происходит локальное разрушение эмиттера, сопровождающееся расплавлением вещества, образованием плазмы и ее выбросом в межэлектродное пространство, локальным изменением геометрии. Снижение напряженности поля и соответственно плотности тока уменьшает вероятность перехода во взрывную эмиссию.

На протяжении последних 15–20 лет усилия многочисленных исследователей были сконцентрированы на синтезе автоэмиссионных структур с минимальным рабочим напряжением. В соответствии с уравнением Фаулера–Нордгейма для плотности тока автоэмиссии очевидными тенденциями являлись повышение форм-фактора для усиления напряженности электростатического поля и снижение работы выхода. Массивы острых катодов Спиндта [1] и массивы нанотрубок [7] реализуют тенденцию повышения форм-фактора, структуры на основе пленок алмазоподобного углерода [3,9] — тенденцию снижения работы выхода активного вещества. Исследования [9,10] показывают, что эффективная работа выхода может составлять аномально низкие

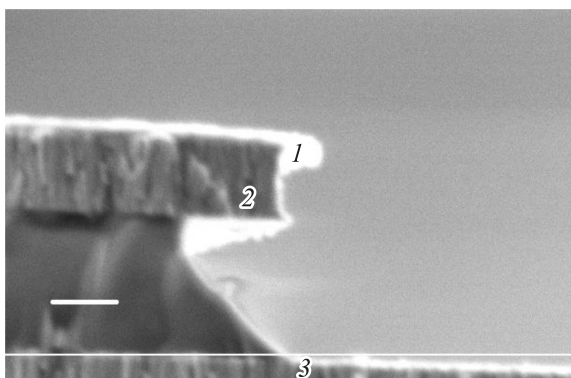


Рис. 1. Планарная наноструктура с полевой эмиссией пленки алмазоподобного углерода в двухуровневом исполнении: 1 — пленка алмазоподобного углерода; 2 — молибденовое основание; 3 — молибденовый вытягивающий электрод; масштабная метка на фотографии соответствует 200 nm; фотография получена с использованием автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU.

десятые и даже сотые доли электрон-вольта, и это связывается с существованием наноразмерных доменов углерода в двух аллотропных состояниях — sp^2 - и sp^3 -гибридизации [11]. Такое явление может объясняться возможностью появления нового состояния вблизи уровня Ферми, связанного с границами доменов.

Заметим при этом, что структуры с низкополевой эмиссией не становятся менее критичными по отношению к флуктуациям упомянутых выше параметров, поскольку крутизна ВАХ таких структур только растет. Снижается лишь уровень рабочих напряжений, но не чувствительность плотности тока полевой эмиссии к изменению локальной напряженности электростатического поля. Это следует, в частности, из анализа структуры уравнения Фаулера–Нордгейма.

Ниже приведены результаты исследования разработанной планарной автоэмиссионной структуры [12,13] с полевой эмиссией наноразмерной пленки алмазоподобного углерода, в которой методами плазменного осаждения, магнетронного напыления и фотолитографии формируется контролируемая зона локализации электростатического поля. Основные элементы структуры в двухуровневом исполнении показаны на рис. 1.

Пленка алмазоподобного углерода толщиной 20 nm высаживается методом PECVD (plasma-enhanced chemical vapor deposition) на основание из молибдена толщиной $\sim 0.3 \mu\text{m}$, обладающее относительно хорошей теплоотводящей способностью. Вытягивающий электрод также выполнен из молибдена. Расстояние между слоями электродов составляет $0.65\text{--}0.70 \mu\text{m}$. Низковольтность структуры обусловлена в первую очередь именно малыми межэлектродными расстояниями. Отработанная технология осаждения пленки алмазоподобного углерода позволяет выдерживать ее толщину с погрешностью не хуже 2 nm. Поэтому зона локализации электростатического поля в области сопряжения „нависающего козырька“ лезвия с молибденовым основанием характеризуется высокой степенью однородности вдоль периметра. Сформированное электростатическое поле в лезвийной структуре обеспечивает защиту эмиттера от ионной бомбардировки [5,6]. Вопросы эффективного транспорта электронного потока со структуры катода в рабочее пространство электровакуумного прибора были рассмотрены ранее в [6,13]. Пример осциллограммы измерений и результаты определения ВАХ одного из разработанных модулей приведены на рис. 2, *a* и *b*, ток модуля $1000 \mu\text{A}$ соответствует средней по площади эмиттера плотности тока $0.3 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Однородность эмиссии элементарных эмиттеров в массиве является необходимым условием построения долговечного автоэлектронного катода. Два из изготовленных модулей были испытаны на долговечность в условиях технического вакуума и продемонстрировали стабильную токоотдачу (длительность прямоугольных импульсов напряжения $320 \mu\text{s}$, скважность 10) в течение 700 и 3000 h с уменьшением тока не более 10% от начального уровня. Это свидетельствует о достаточно высокой однородности эмиссии вдоль периметра лезвийной структуры модуля. Возможным механизмом стабилизации процесса эмиссии является, на наш взгляд, возникающая в сильном электростатическом поле проводимость двухфазной алмазоподобной пленки. Она обусловлена эффектом Пула–Френкеля [14], который также обладает механизмом ограничения туннельного тока. Для проверки данного предположения были изготовлены модули, аналогичные описанным выше, но без напыления пленки алмазоподобного углерода. Они также показали приемлемый начальный уровень полевой эмиссии, но темпы деградации оказались существенно выше, время работы ни одного из них при испытаниях на долговечность не превысило 150 h.

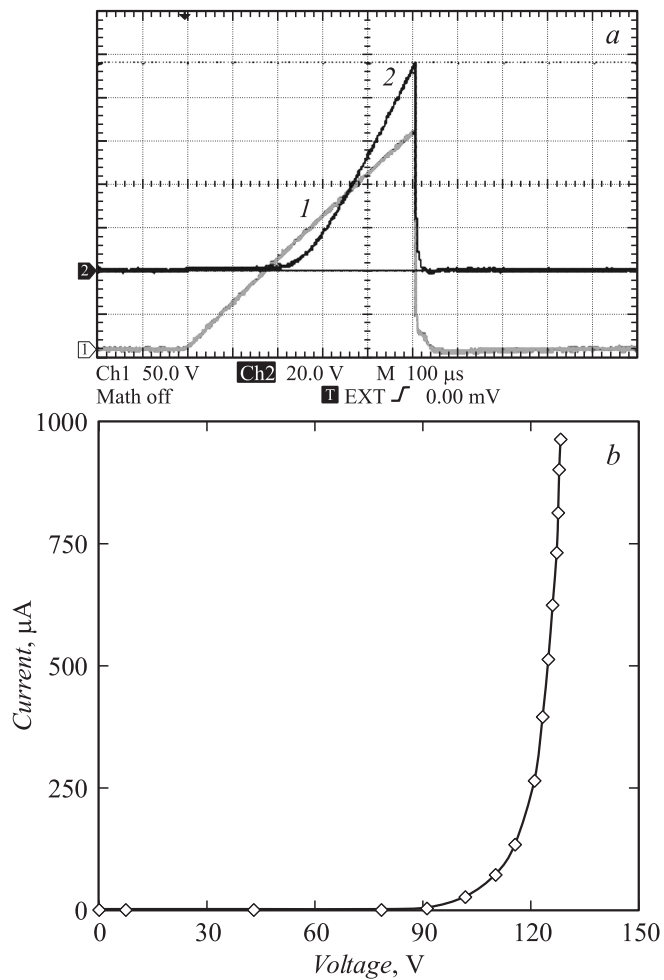


Рис. 2. К определению ВАХ автоэмиссионного модуля: *a* — развертка во времени пилообразного импульса напряжения (кривая 1) и падения потенциала на измерительном сопротивлении (кривая 2); *b* — ВАХ экспериментального автоэмиссионного модуля, построенная на основе обработки кривых 1 и 2.

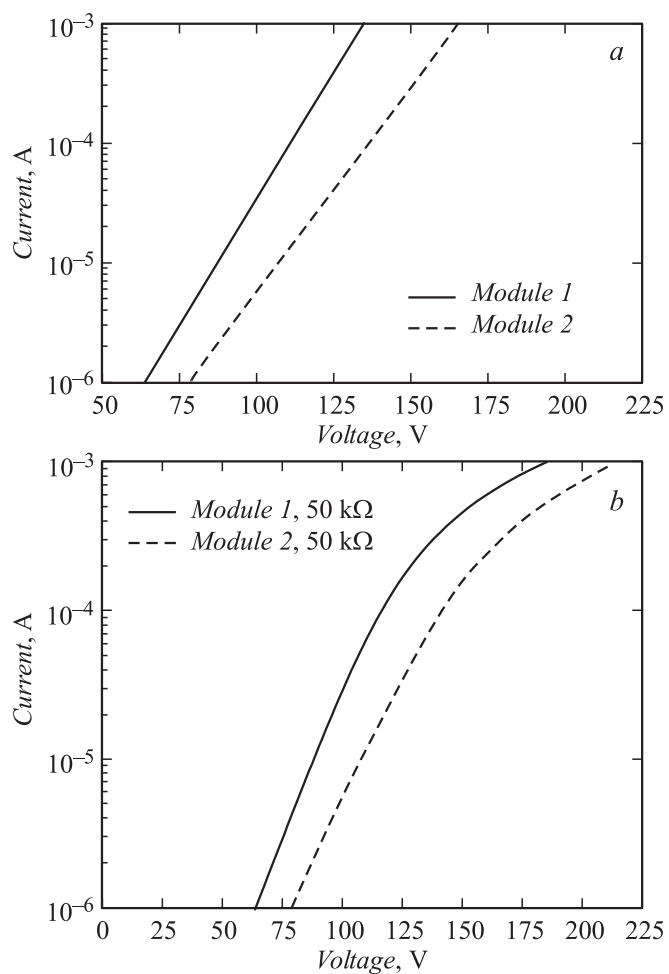


Рис. 3. ВАХ модулей 1 и 2 без балластных сопротивлений (а) и с включением последовательно в цепь балластных сопротивлений $R_b = 50 \text{ k}\Omega$ (b).

Вместе с тем следует отметить, что присущая структурам с полевой эмиссией критичность приводит к определенному разбросу параметров ВАХ различных модулей, как показано на рис. 3, а. Для

обеспечения тока эмиссии модулей на одинаковом уровне, например $1000 \mu\text{A}$, необходимо подавать различающееся по величине напряжение (от 165 до 185 V в нашем случае). Такого рода неоднородность представляет собой дополнительную трудность при создании катодов с развитой эмитирующей поверхностью и высоким интегральным током автоэмиссии. Возможными альтернативными путями решения этой проблемы являются следующие: подбор и объединение в единый модуль с одинаковыми параметрами, включение последовательно в цепь каждого модуля отдельного подстроечного сопротивления и, наконец, использование балластных сопротивлений одного номинала. При необходимости создания катодов с интегральным током порядка 1 A, учитывая большое количество коммутируемых модулей (назовем их эмитирующими пикселями), наиболее предпочтительным является последний из перечисленных вариантов. Как возможный вариант решения по второму пути можно привести описанное в [15] использование эффекта изменения электрического сопротивления металлического острия с повышением токовой нагрузки. В нашем случае в цепь каждого пикселя включаем последовательно высокоомное сопротивление R_b , результаты проведенного расчета его влияния представлены на рис. 3, *b*. Видно, что для пикселя с первоначально низковольтной ВАХ допустимое предельное напряжение растет со 135 до 185 V, а для пикселя с высоковольтной ВАХ — со 165 до 215 V. Но при максимально допустимом приложенном напряжении 185 V (соответствует напряжению, при котором достигается максимально допустимый ток пикселя 1) отношение токов этих пикселей уменьшается с 11 до 1.9 раза, а суммарный ток двух пикселей растет в 1.5 раза. Такая интеграция балластных сопротивлений R_b обеспечивает возможность масштабирования — построения автоэмиссионного катода с развитой поверхностью, в котором реализуются механизм ограничения токоотдачи активных пикселей и стимуляция эмиссии остальных пикселей структуры одновременно.

Таким образом, результаты приведенных исследований демонстрируют перспективы использования предложенных многоэлектродных планарных наноструктур с полевой эмиссией пленки алмазоподобного углерода для разработки низковольтных, стабильных и долговечных катодов. Экспериментально получена средняя плотность тока на уровне $0.1\text{--}0.3 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ в течение времени до 3000 h. Рассмотрены возможности повышения интегрального тока катода с развитой эмитирующей поверхности формированием распределенных балластных сопротивлений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 13-07-00734-а.

Список литературы

- [1] *Mustonen A., Guzenko V., Spreu C., Feurer T., Tsujino S.* // *Nanotechnology*. 2014. V. 25. P. 085 203(1–6).
- [2] *Соминский Г.Г., Тумарева Т.А., Тарадаев Е.П., Мишин М.В., Степанова А.Н.* // *ЖТФ*. 2015. Т. 85. В. 1. С. 138–141.
- [3] *Рахимов А.Т.* // *УФН*. 2000. Т. 170. № 9. С. 996–999.
- [4] *Бочаров Г.С., Елецкий А.В.* // *ЖТФ*. 2011. Т. 81. В. 4. С. 111–116.
- [5] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.* // *Письма в ЖТФ*. 2006. Т. 32. В. 20. С. 52–59.
- [6] *Морев С.П., Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Макеев А.Э., Якунин А.Н.* // *Радиотехника и электроника*. 2013. Т. 58. № 4. С. 399–408.
- [7] *Егоров Н.В., Шешин Е.П.* *Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы*. М.: Интеллект, 2011. 703 с.
- [8] *Месяц Г.А.* // *УФН*. 1995. Т. 165. № 6. С. 601–616.
- [9] *Robertson J.* // *Mater. Sci. Eng.: R: Reports*. 2002. V. 37. P. 129–281.
- [10] *Forbes R.G.* // *28th International Vacuum Nanoelectronics Conference IVNC 2015*. Guangzhou, July 2015. P. 20–21. doi: 10.1109/IVNC.2015.7225514.
- [11] *Образцов А.Н., Волков А.П., Павловский И.Ю.* // *Письма в ЖЭТФ*. 1998. Т. 68. В. 1. С. 56–60.
- [12] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Морев С.П., Мосияш Д.С., Якунин А.Н.* // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40. В. 9. С. 86–94.
- [13] *Aban'shin N.P., Loginov A.P., Mosiyash D.S., Yakunin A.N.* // *28th International Vacuum Nanoelectronics Conference IVNC 2015*. 13–17 July 2015. Guangzhou, China. 2015. P. 202–203. doi:10.1109/IVNC.2015.7225583
- [14] *Насыров К.А., Гриценко В.А.* // *УФН*. 2013. Т. 183. № 10. С. 1099–1114.
- [15] *Schwoebel P.R., Spindt C.A., Holland C.E.* // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2005. V. 23. P. 691.