

13

## Исследование процесса формирования углеродной наноразмерной автоэмиссионной структуры с ионной защитой

© Н.П. Абаньшин, Б.И. Горфинкель, С.П. Морев,  
Д.С. Мосияш, А.Н. Якунин

ООО „Волга-Свет“, Саратов

НПП „Торий“, Москва

Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

E-mail: anyakunin@mail.ru

Поступило в Редакцию 9 января 2014 г.

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования критичности технологического процесса формирования наноразмерных лезвий из  $\alpha$ -углерода планарных автоэмиссионных структур с ионной защитой. Показано, что разработанная технология обеспечивает надежность управления процессом. Обнаружена слабая зависимость уровня напряженности в области острия эмиттера структуры от длины „козырька“ лезвия, что способствует хорошей воспроизводимости ее параметров.

Активно ведущиеся исследования полевой эмиссии наноразмерных структур, в том числе углеродных [1–2], объясняются значимостью ожидаемых преимуществ от использования источников тока на основе автоэлектронной эмиссии по сравнению с традиционными термоэлектронными катодами. Несмотря на то что сообщения о достижении плотности автоэмиссионного тока на уровне  $1 \text{ A/cm}^2$  и более появляются достаточно регулярно [3,4], практическое освоение и промышленное применение таких источников, особенно в приложении к современным электровакуумным приборам, пока остается актуальной, но нерешенной задачей.

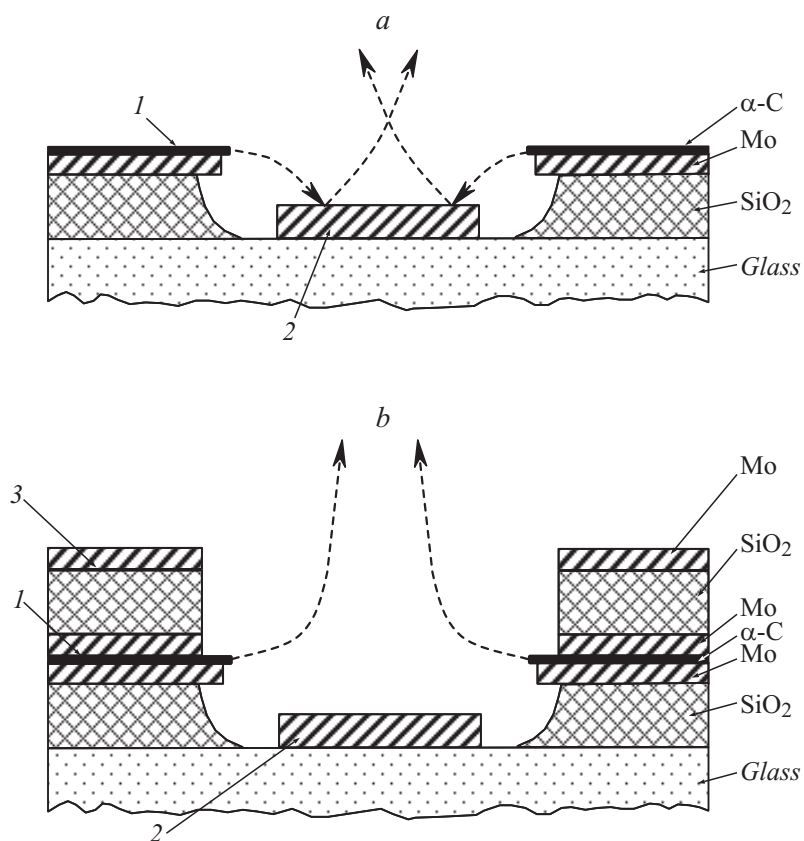
Фундаментальной причиной этого, на наш взгляд, является присутствующая известным структурам низкая воспроизводимость (под этим понимается стохастический характер формирования наноразмерных структур при выполнении технологических процессов) и, как следствие,

нестабильность автоэлектронной эмиссии. К таким процессам можно отнести, например, электрофоретическое осаждение неориентированных массивов нанотрубок [5], синтез неориентированных графеновых кластеров [2], применение терморасширенного графита [1]. Названные структуры с успехом могут использоваться в качестве полевых катодов катодолюминесцентных источников света, в ряде случаев — в матричных дисплеях. В электровакуумных приборах экстремальной электроники — лампах бегущей волны (ЛБВ), клистродах и др. — довольно жесткое требование достижения высокой плотности тока дополняется обязательными условиями обеспечения качества формируемого электронного потока по распределению как модуля вектора скорости электронов, так и углового разброса [6,7]. Упорядоченные структуры (массивы ориентированных нанотрубок, катодов Спиндта) в наибольшей степени могут удовлетворять таким требованиям [3,7].

Хотя удельный ток полевой эмиссии может быть значительным по величине, достижение равномерной эмиссии с соседних массивов элементарных эмиттеров оказывается невозможным. Кроме того, как показывает практический опыт, при длительной эксплуатации приборов с автоэмиссионными катодами, изготовленными по традиционной технологии, зачастую происходит непредсказуемая деградация отдельных центров эмиссии. Ее связывают с локальным тепловым разрушением элементарных эмиттеров при прохождении автоэмиссионного тока через острие (эффект Ноттингема становится механизмом для запуска необратимого процесса взрывной эмиссии [8]) и вследствие бомбардировки ионным потоком [9]. Определенную роль в процессе деградации играют также пондеромоторные силы взаимодействия электростатического поля с наноструктурами в зонах локализации его напряженности.

Развивающийся сегмент планарных структур [10–12], в которых эмиссионный слой формируется на высокопроводящей подложке с применением методов фотолитографии и принтинга наноструктур, дает возможность снизить, но не устранить в полной мере негативную роль разрушающих процессов.

В работе [13] для автоэмиссионной структуры планарно-торцевого типа, представленной на рис. 1, *a*, теоретически была обоснована причина экспериментально наблюдаемого, но не нашедшего удовлетворительного объяснения ее существенного преимущества перед острийными структурами типа катода Спиндта. Найдено, что фокусировка ионного потока на острие катода Спиндта повышает удельную тепловую



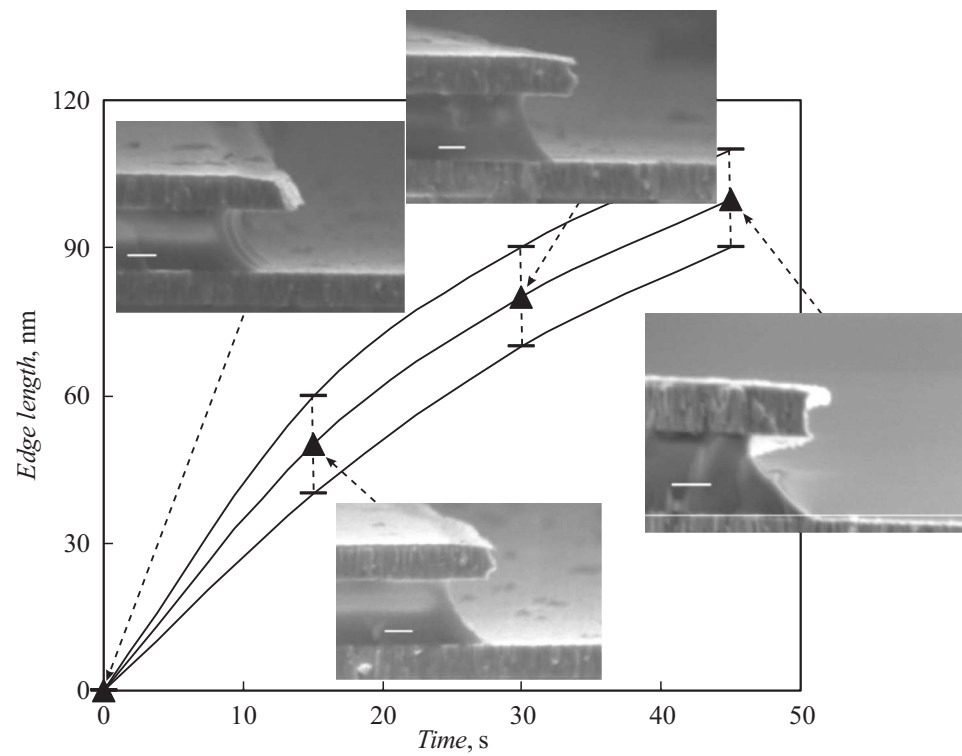
**Рис. 1.** Схема углеродной наноразмерной автоэмиссионной структуры с ионной защитой: *a* — вариант с одним управляющим электродом; *b* — вариант с двумя управляющими электродами, адаптированный для применения в ЭВП СВЧ; 1 — эмиттер; 2 и 3 — управляющие электроды.

нагрузку более чем на 5 порядков при сравнимых топологических параметрах. Экспериментальное доказательство того факта, что именно ионы молекул газов остаточной атмосферы технического вакуума могут стать причиной необратимой деградации автоэммиттеров, дано авторами работы [9].

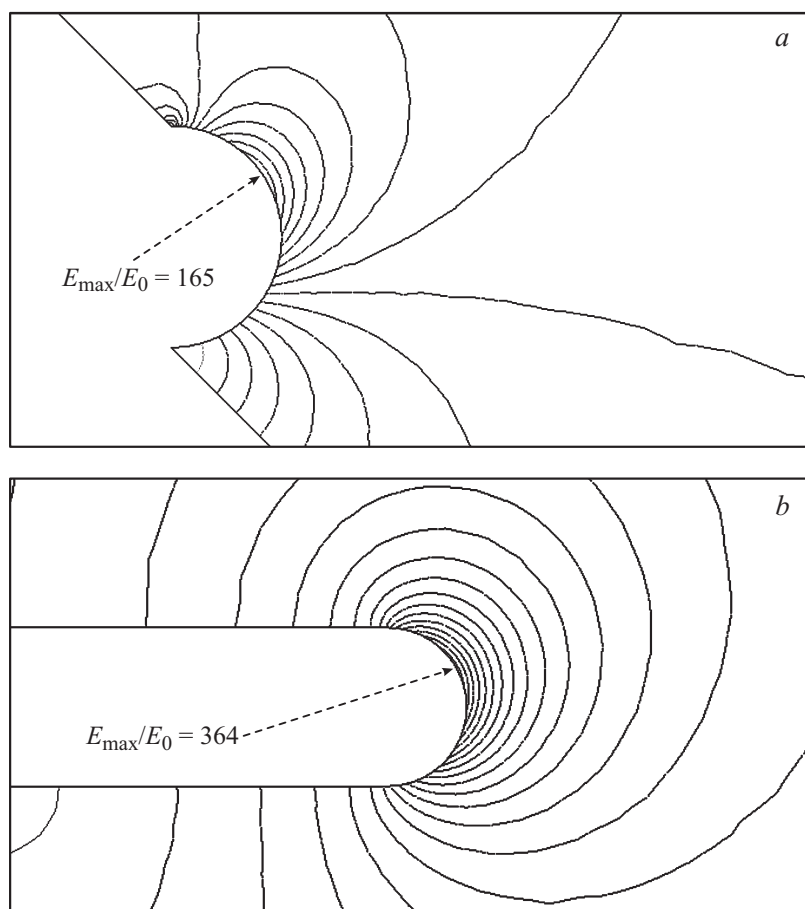
Необходимость адаптации структуры [13] с эмитирующим лезвием  $I$  из  $\alpha$ -углерода для обеспечения возможности применения в мощных ЛБВ [6], сенсорах нового типа [14] и для повышения полезного выхода электронного потока за счет устранения токоперехвата управляющим электродом 2 потребовала введения дополнительного управляющего электрода 3, как показано на рис. 1, *b*. Функциональное назначение электрода 2 в данной структуре коренным образом меняется. В структуре на рис. 1, *a* он играл роль управляющего электрода, обеспечивая необходимый уровень напряженности поля на острие лезвия, достаточный для автоэлектронной эмиссии. В структуре же на рис. 1, *b* электрод 2, имея потенциал эмиттера или близкий к нему, гарантированно обеспечивает отклонение ионного потока от острия эмиттера и его перехват [6,15]. А поле с необходимым уровнем напряженности на эмиттере создается подачей ускоряющего потенциала на управляющий электрод 3. В результате, как показано в [6], в многоэлектродной структуре (рис. 1, *b*) формируется такое электростатическое поле сложной топологии, которое не только позволяет защитить эмиттер от ионной бомбардировки, но и обеспечить ламинарность криволинейного автоэлектронного микропотока, строго направить его в зону пространства взаимодействия СВЧ-прибора, упростить решение задачи эффективной фокусировки макропотока в приборе.

Ключевым элементом концепции многоэлектродной углеродной наноразмерной автоэмиссионной структуры с ионной защитой является стабильность технологии индивидуального формирования топологии эмитирующего лезвия из  $\alpha$ -углерода при одновременной чувствительности к параметрам управления. Поэтому необходимая надежность управления технологическим процессом в значительной степени определяется степенью его изученности и особенно кинетики протекающих реакций. С этой целью было исследовано влияние технологии формирования лезвия эмиттера на возможное изменение напряженности поля на острие.

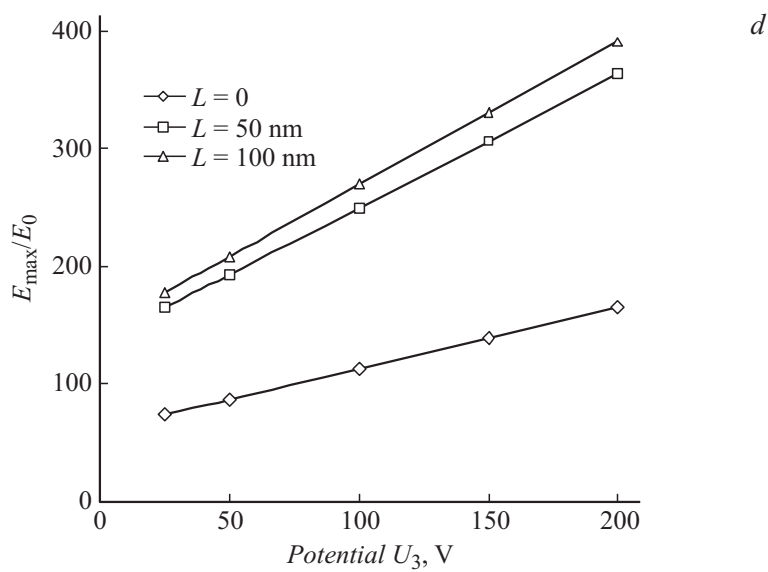
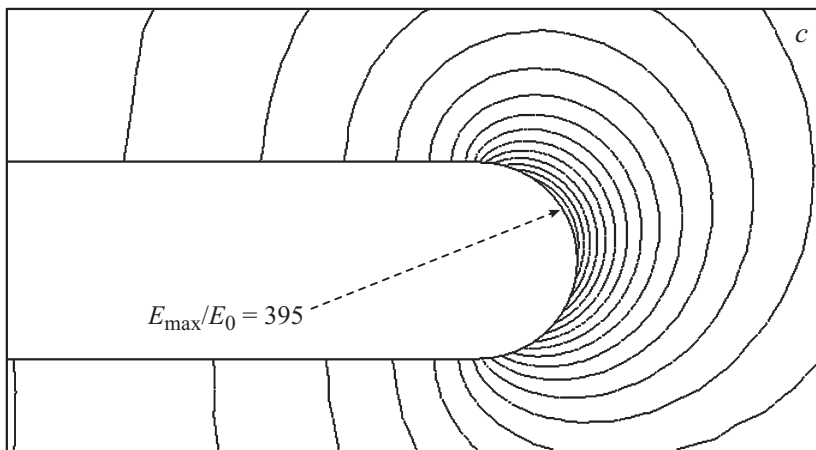
Оценку кинетики изменения топологии наноструктуры и длины лезвия  $L$  из  $\alpha$ -углерода (длины выступающей над краем молибденового слоя „kozyрька“ углеродной пленки) можно сделать из анализа приведенных на рис. 2 результатов, построенных в зависимости от времени плазмохимического травления молибденового слоя. Данный технологический процесс определяет длину эмиттера в рабочей структуре. Видно, что за первые 15 s процесса травления лезвие достигает длины 50 nm, а



**Рис. 2.** Динамика формирования лезвия эмиттера из  $\alpha$ -углерода — зависимость длины лезвия от времени травления молибденовых слоев; масштабные метки на фотографиях-вставках соответствуют 200 nm.



**Рис. 3.** Распределение модуля напряженности электростатического поля, формируемого в окрестности острия эмиттера ( $a-c$ ) и зависимость максимального модуля нормированной напряженности поля  $E_{\max}/E_0$  при изменении рабочего потенциала  $U_3$  для 3 вариантов топологии наноразмерной структуры с различающейся длиной лезвия эмиттера ( $d$ ):  $a$  — рассчитано для топологии, соответствующей началу операции травления молибденовых слоев, длина лезвия  $L = 0$ ;  $b$  —  $L = 50$  nm;  $c$  —  $L = 100$  nm. Шаг изолиний модуля напряженности поля составляет 5% от максимального значения  $E_{\max}/E_0$ , указанного на каждом фрагменте. Стрелкой указана точка на острие, в которой достигается максимум модуля напряженности поля, там же указано значение  $E_{\max}/E_0$ .



**Рис. 3** (продолжение).

за последующие 30 s — 100 nm. Скорость формоизменения уменьшается со временем, что позволяет более тщательно контролировать процесс на завершающей стадии.

Распределение изолиний модуля напряженности поля для трех длин лезвия — 0, 50 и 100 nm показано на рис. 3, *a–c*. Решение получено численно методом конечных элементов с учетом топологических особенностей структуры в соответствии с рис. 1, *b*. Во всех 3 случаях потенциал эмиттера  $U_1$  и управляющего электрода 2  $U_2$  задавался равным 0, электрода 3 —  $U_3 = 200$  V, средняя напряженность поля в зазоре между электродом 2 и анодом (не показан на рис. 2, *b*) принималась равной  $50$  V/ $\mu$ m. Из сравнения результатов на рис. 3, *a–c* следует, что при изменении длины лезвия  $L$  в широком диапазоне (от 50 до 100 nm, т. е. в 2 раза) максимум напряженности поля меняется не более чем на 9%. Положение максимума напряженности поля и распределение изолиний также весьма близки на рис. 3, *b* и *c*. В то же время различие уровня максимума напряженности поля по сравнению с результатами на рис. 3, *a* достигает 2.4 раза. Такое же соотношение между уровнями максимальной напряженности поля при различной длине лезвия  $L$  сохраняется и при варьировании управляющего потенциала  $U_3$  в диапазоне 25–200 V, результаты расчета представлены на рис. 3, *d*.

Приведенные результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о высокой надежности прецизионного управления параметрами технологического процесса — обеспечивается точность формирования длины „козырька“ лезвия не хуже 20 nm. Малая критичность напряженности поля по отношению к существенному изменению длины лезвия эмиттера позволяет прогнозировать хорошую воспроизводимость автоэмиссионных свойств структур с ионной защитой и перспективу их применения в ЭВП СВЧ. Важным достоинством обсуждаемой технологии также является совместимость с известной и хорошо отработанной технологической цепочкой оборудования для изготовления полупроводниковых приборов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 13-07-00734-а, 12-07-12066-офи\_м.

## Список литературы

- [1] *Одинокое В., Павлов Г., Шешин Е.* // Наноиндустрия. 2010. № 5. С. 14.
- [2] *Рахимов А.Т.* // УФН. 2000. Т. 170. № 9. С. 996.
- [3] *Milne W.I., Teo K.B.K., Minoux E.* et al. // J. Vacuum Science & Technology. B. 2006. V. 24. Iss. 1. P. 345.



- [4] *Lei W., Zhang X., Chen J., Zhao Z., Cui Y., Wang B.* // IEEE Transactions on Electron. Devices. 2011. V. 58. Iss. 10. P. 3616.
- [5] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 7. С. 94.
- [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.
- [7] *Whaley D., Guggal R., Armstrong C., Holland C., Spindt C., Thibert D.* // IEEE 14th International Conference on Vacuum Electronics (IVEC). Paris, 2013. P. 1. doi: 10.1109/IVEC.2013.6571009.
- [8] *Петрин А.Б.* // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. № 2. С. 369.
- [9] *Васильева Е.А., Клещ В.И., Образцов А.Н.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 7. С. 107.
- [10] *Calderón-Colón X., Geng H., Gao B., An L., Cao G., Zhou O.* // Nanotechnology. 2009. V. 20. P. 325707. doi: 10.1088/0957-4484/20/32/325707.
- [11] *Sanborn G., Turano S., Collins P., Ready W.J.* // Appl. Phys. A. 2013. V. 110. Iss. 1. P. 99.
- [12] *Zanin H., May P.W., Hamanaka M.H.M.O., Corat E.J.* // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2013. V. 5. Iss. 23. P. 1223.
- [13] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 20. С. 52.
- [14] *Акчурин Г.Г., Якунин А.Н., Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Акчурин Г.Г., мл.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 12. С. 8.
- [15] *Гуляев Ю.В., Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Морев С.П., Резчиков А.Ф., Сеницын Н.И., Якунин А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 11. С. 63.