

07;11

## **Особенности применения автоэмиссионных углеродосодержащих структур в катодолюминесцентных источниках света**

© Н.П. Абаньшин, Б.И. Горфинкель, А.Н. Якунин

НИИ „Волга“, Саратов  
Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов  
Саратовский государственный технический университет  
E-mail: anyakunin@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 декабря 2011 г.

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования катодолюминесцентных источников света с автоэлектронной эмиссией углеродосодержащих структур. Дается сравнительный анализ распределения токооседания на светоизлучающую поверхность анода в различных конструктивных решениях. Оценивается влияние параметров импульсного режима на яркость светового потока и энергоэффективность приборов. Обсуждено перспективное направление развития катодолюминесцентных ламп на основе автоэмиссионных структур планарно-торцевого типа.

В последние годы вместе с разработкой катодов на основе полевой эмиссии различных углеродосодержащих наноразмерных структур [1–4] появилась определенная уверенность в возможности практической реализации идеи замены традиционных источников света — ламп накаливания — альтернативными вакуумными катодолюминесцентными лампами (ВКЛ). Отказ от термоэлектрического источника электронов и применение люминофоров с высоким энергетическим выходом делает ВКЛ энергоэффективным. Дополнительным немаловажным их преимуществом перед другими типами газонаполненных люминесцентных ламп является экологическая безопасность, устранение необходимости развития и поддержания дорогостоящей инфраструктуры для демеркуризации вышедших из строя ламп.

Ранее в [3] наряду с преимуществами различных автоэмиссионных структур была дана их критическая оценка, проведен сравнительный

анализ методов стимулирования автоэмиссии. Вместе с тем вопросы практического приложения фундаментального явления полевой эмиссии связаны с решением целого ряда нетривиальных задач, исследованию путей решения которых посвящена представленная работа.

Стремление к максимальному упрощению конструкции и технологии изготовления катодолюминесцентных ламп привело к синтезу приборов, в которых автоэмиссионный катод выполнен в виде стеклянного капилляра с внутренним диаметром 0.2 mm и наружным диаметром 2 mm, внутри которого расположен пучок наноструктурированных углеродных волокон [5]. Высота выступающего из капилляра пучка углеродных волокон составляет 0.7 mm. Концевая часть пучка имеет форму сферической поверхности с радиусом кривизны, равным внутреннему радиусу капилляра. Такая конструкция эмиттера обладает хорошими автоэмиссионными свойствами и долговечностью в диодном варианте. Однако для применения в светоизлучающем элементе она должна быть определенным образом адаптирована, чтобы обеспечить как энергоэффективность, так и надежность прибора в целом. Узел катода интегрирован внутрь стеклянного баллона, по размерам и геометрии идентичного баллону типовой лампы накаливания. Анод выполнен в виде осесимметричного конуса с минимальным диаметром 7 mm, максимальным диаметром 18 mm и высотой 20 mm. Конструкция светоизлучающего элемента обеспечивает соосное расположение эмиттера внутри анода. Рабочая разность потенциалов анода и катода составляет 5 kV. Для повышения выхода светового излучения на коническую поверхность баллона, сопряженную с цокольной частью, последовательно нанесены зеркальное покрытие и слой люминофора. В результате интенсивность светового потока, направленного наружу, возрастает почти вдвое.

Исходя из физики процессов катодолюминесценции очевидно, что для повышения энергетического выхода необходимо стремиться к максимальному снижению неравномерности токооседания на светоизлучающую поверхность, покрытую слоем люминофора. Любая неравномерность распределения электронного потока приводит к нежелательному локальному перегреву люминофора, снижению эффективности и его преждевременной деградации. Поэтому исследование особенностей токооседания в светоизлучающем элементе в зависимости от конструктивных и эксплуатационных факторов представляется весьма актуальным.

Расчет распределения электростатического поля в светоизлучающем элементе траекторий движения электронного потока автоэлектронов в данной электронно-оптической системе проведен с использованием моделей и программ на основе развития [6] методом конечных элементов. Расчеты проведены в предположении сферической формы эмитирующей поверхности катода с радиусом кривизны, равным цилиндрическому радиусу канала стеклянного капилляра  $R_0 = 0.1 \text{ mm}$ . Отметим, что отношение площадей поверхности люминофора и поверхности эмиттера превышает величину  $10^4$ , т.е. эмиттер можно считать точечным. Для удобства и полноты анализа моделируемых электрофизических процессов обеспечена визуализация расчетной информации в виде топограмм: распределения поля электростатического потенциала; модуля напряженности электрического поля; радиальной составляющей напряженности электрического поля; продольной составляющей напряженности электрического поля; траекторий движения автоэлектронов в светоизлучающем элементе. Полученные результаты позволяют оценить качественно и количественно функцию распределения удельной мощности токооседания на рабочую поверхность светоизлучающего элемента, покрытую слоем люминофора.

Рассмотрены конструктивные решения, построенные на основе описанного выше исходного диодного варианта введением дополнительного управляющего электрода — „гейта“ для обеспечения возможности низковольтного управления током пучка. Их особенности указаны в табл. 1. Результаты траекторного анализа (на рис. 1 приведены типичные распределения поля и траектории только для варианта 4) были использованы для получения оценки плотности токооседания по поверхности анода и сведены в табл. 2. Поскольку анод имеет коническую форму, то зависимости плотности тока от радиальной координаты однозначно выражаются как функции продольной координаты или преобразуются в зависимости распределения плотности тока по высоте анода.

Анализ полученных результатов (табл. 2) показывает, что, несмотря на существенно различающиеся размеры „точечного“ эмиттера и светоизлучающей поверхности, а также значительное расстояние между точками эмиссии и оседания электронного потока, характер токооседания весьма далек от равномерного. Модель дискретизации эмитируемого электронного потока такова, что каждая трубка тока содержит

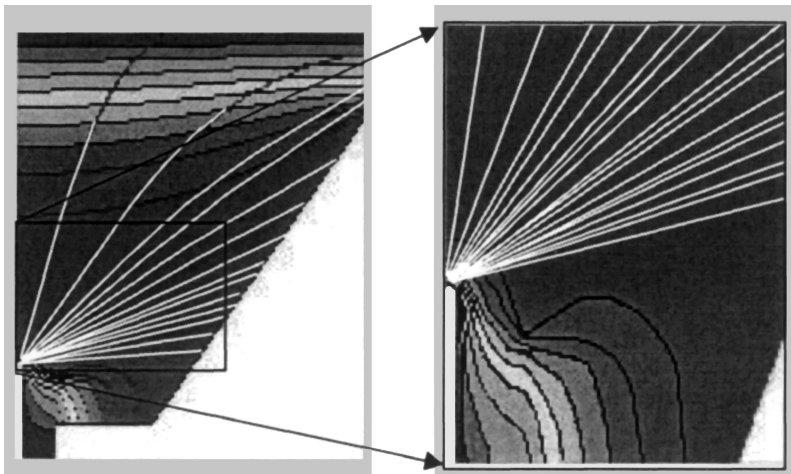
**Таблица 1.** Конструктивные особенности расчетных светоизлучающих элементов

Номер варианта	Характеристики конструкции
1	Наружная поверхность стеклянного капилляра металлизирована с целью формирования управляющего электрода (гейта).
2	Гейт выполнен в виде мелкоячеистой плетеной сетки, расположенной в радиальном сечении, плоскость которого отстоит от вершины эмиттера на 0.2 мм. Размер сетки в радиальном направлении равен внешнему диаметру стеклянного капилляра.
3	Гейт выполнен в виде шайбы с центральным отверстием и расположен в поперечном сечении на 0.2 мм выше острия эмиттера. Диаметр отверстия электрода равен 2 мм, по внешнему диаметру электрод контактирует с коническим анодом.
4	Гейт выполнен в виде тонкостенной цилиндрической оболочки диаметром 2 мм и высотой 1 мм, расположенной коаксиально с эмиттером.

**Таблица 2.** Характеристика токооседания на светоизлучающую поверхность

Номер варианта	Максимальная нормированная плотность тока $J_{\max}$	Отношение максимальной нормированной плотности тока $J_{\max}$ к средней $J_{av}$	Размеры зоны оседания по радиальной координате	
			$R_{\min}$ , мм	$R_{\max}$ , мм
1	1.12	3.3	4.7	8.7
2	0.68	3.2	5.8	8.8
3	0.55	1.6	5.5	8.2
4	0.71	1.3	4.3	8.3

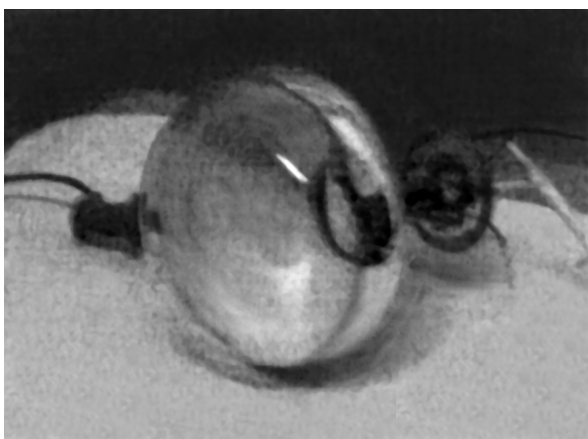
одинаковый по величине ток, поэтому сгущение или разряжение траекторий электронного потока на рис. 1 соответствует уменьшению или увеличению плотности электронного потока. Если за полюс обозначить точку сферической поверхности эмиттера, расположенную на оси прибора, то из рис. 1 видно, что наибольший по величине ток эмитируется с



**Рис. 1.** Топограмма эквипотенциалей электростатического поля и траектории движения автоэлектронного потока в расчетной области лампы (слева) и в прикатодной области (справа).

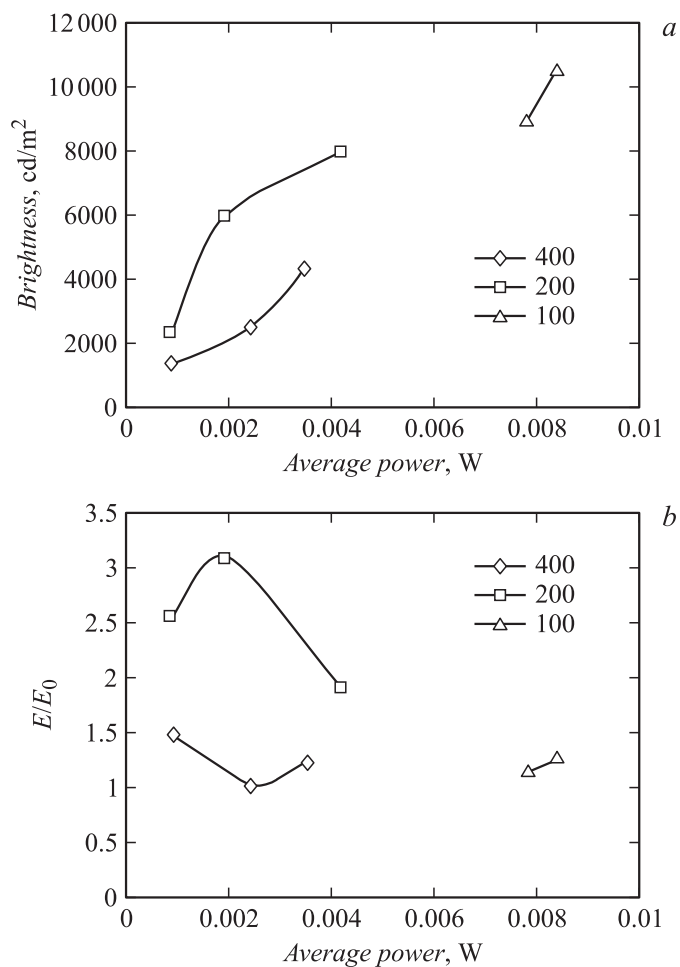
„экваториальной“ области эмиттера. Эта неравномерность проявляется и на распределении плотности тока на аноде (табл. 2). Из рассмотренных вариант 4 имеет наиболее сбалансированное соотношение площади облучения анода электронным потоком и неравномерности плотности токооседания. Но и для этой конструкции характерно наличие зон локализации токооседания с плотностью тока, в 1.3 раза выше средней. Для остальных вариантов площадь облучения меньше и степень локализации выше. Следует отметить, что большинство траекторий эмитированных электронов в области катода имеет большой угол наклона по отношению к оси прибора, т.е. они значительно отклонены в радиальном направлении. Такой характер эмиссии автоэлектронного потока, в целом, способствует эффективному распределению его по конической поверхности светоизлучающего элемента.

Экспериментальные макеты ламп (конструктивный вариант 4) были изготовлены с различными типами люминофоров (красный —  $ZnCdS$ , легированный серебром; зеленый —  $ZnS$ , легированный медью; синий —  $ZnS$ , легированный серебром; белый —  $Y_2O_2S$ , легированный



**Рис. 2.** Экспериментальный макет катодолуминесцентной лампы с полевым катодом.

тербием) и испытаны (рис. 2). На рис. 3 приведены результаты измерений, выполненные в импульсном режиме работы лампы. Длительность импульса ускоряющего напряжения во всех сериях измерений оставалась постоянной и равной  $50 \mu\text{s}$ . Скважность импульсов  $Q$  в различных сериях устанавливалась 100, 200 и 400. С учетом этого при одинаковой мощности пучка в импульсе средняя за период мощность различалась по величине обратно пропорционально скважности. Результаты измерения яркости, приведенные на рис. 3, *a*, свидетельствуют о существенной ее зависимости от скважности при одинаковых уровнях средней мощности. Кривые для скважностей 200 и 400 показывают почти двукратное различие по уровню яркости, причем максимальную яркость прибор имеет при  $Q = 200$ . Уменьшение  $Q$  до 100 увеличивает среднюю за период мощность пучка, но рост яркости при этом не становится значительным. Если ввести в рассмотрение параметр эффективности  $E$ , пропорциональный отношению яркости к средней за период мощности пучка, то немонотонность зависимости  $E/E_0$ , характеризующей энергоэффективность прибора (здесь  $E_0$  — нормирующий множитель), становится очевидной (рис. 3, *b*). Для режимов  $Q = 100$  и  $Q = 400$  величина  $E/E_0$  остается в диапазоне 1.0–1.5, а для  $Q = 200$  параметр эффективности  $E/E_0$  меняется в диапазоне 2.0–3.0.



**Рис. 3.** Зависимость яркости ВКЛ (a) и параметра эффективности  $E/E_0$  (b) от средней за период мощности токооседания на светоизлучающую поверхность.

Существование оптимальной скважности может иметь следующую физическую интерпретацию. Фундаментальным свойством люминофоров при катодолюминесценции является инерционность послесвечения,

которая характеризуется для получивших широкое применение люминофоров временами до 10 ms [7]. При высокой скважности  $Q = 400$  за первую треть паузы уровень интенсивности светового потока падает практически до нуля, и во время следующих двух третей паузы свечение отсутствует. При скважности  $Q = 200$  длительность паузы уменьшается, и свечение заполняет паузу на три четверти. Это способствует повышению энергоэффективности прибора. В случае  $Q = 100$  пауза еще более сокращается, в конце ее интенсивность свечения может достигать 15%. Однако высокая частота следования импульсов может привести к росту средней мощности нагружения, нежелательному нагреву люминофора и температурному тушению люминесценции. Нелинейность свойств люминофора может существенно ухудшить эффективность процессов преобразования кинетической энергии заряженных частиц в кванты излучения.

Следует также отметить, что практически во всех режимах испытаний макетов наблюдается неравномерность свечения светоизлучающей поверхности, свидетельствующая о неоднородности оседающего электронного потока. Причем эти неоднородности распределяются произвольно во времени и по поверхности, не изменяя заметно уровня яркости лампы в целом. Вероятной причиной указанных процессов могут стать колебания отдельных фибрилл углеродных волокон пучка под действием пондеромоторных сил в интенсивном электростатическом поле. В результате возникают отдельные неустойчивые „струи“ автоэлектронного потока.

Анализ полученных результатов позволяет прийти к заключению, что дальнейшее совершенствование ВКЛ связано с разработкой автоэмиссионных эмиттеров с развитой поверхностью, что обеспечит как улучшение равномерности токооседания на светоизлучающую поверхность, так и качество управления удельной нагрузкой на люминофор. Исследования распределенных эмиттеров на основе массивов нанотрубок [4,8] показывают, что явление взаимной экранировки нанотрубок приводит к снижению эффективности полевой эмиссии с развитых поверхностей. В теоретических и экспериментальных исследованиях удовлетворительные результаты по автоэмиссии получены лишь в краевых областях массивов нанотрубок [9]. На наш взгляд, перспективы развития ВКЛ связаны с внедрением конструкций и технологий изготовления катодов планарно-торцевого типа [5,6,10] на основе алмазоподобных пленок. На стандартном оборудовании с нормой  $1.5 \mu\text{m}$



достигнута стабильность технологических процессов формирования топологии автоэмиссионной структуры при одновременной чувствительности к параметрам управления (формирование лезвия эмиттера с точностью 20–30 nm). Тем самым обеспечивается воспроизводимость электрических характеристик ячеек матрицы микрокатодов. Переход на данный тип автокатодов дает перспективу успешного решения проблемы неравномерности и нестабильности токооседания, создания ВКЛ с развитой светоизлучающей поверхностью.

Данная работа поддержана РФФИ (грант № 10-07-00526-а).

## Список литературы

- [1] Лейченко А., Шешин Е., Шука А. // НТБ. Электроника. 2007. Т. 94. В. 6. С. 94–101.
- [2] *Obraztsov A.N., Klesch V.I.* // J. Nanoelectronics and Optoelectronics. 2009. N 4. P. 207–219.
- [3] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 7. С. 94–102.
- [4] *Елецкий А.В.* // УФН. 2010. Т. 180. № 9. С. 897–930.
- [5] *Aban'shin N.P., Gorfinkel' B.I., Yakunin A.N.* // Proc. of Int. Symposium „Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy“. Zelenograd–Moscow, Russian, 2011. P. 198.
- [6] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 20.
- [7] *Дамбраускас С.Г., Рахимов А.Т., Саенко В.Б.* // Препринт НИИЯФ МГУ. 2003. 5.718. 13 с.
- [8] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.* // Сб. Тр. конференции „Нанотехнологии — производству 2010“. Фрязино, декабрь 2010. С. 164–169.
- [9] *Pimenov S.M., Frolov V.D., Zavedeev V.E., Abanshin N.P., He-Yun Du, Wei-Chao Chen, Li-Chyong Chen, Jih-Jen Wu, Kuci-Hsien Chen* // Appl. Phys. A. 2011. V. 105. P. 11–16.
- [10] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.* Положительное решение по заявке на изобретение № 2010128866/07(040960) с приоритетом от 12.07.2010 г.