

НАНОСТРУКТУРНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИСТОЧНИКАХ СВЕТА

Катодолюминесцентные источники света имеют ряд преимуществ по сравнению с другими источниками, в частности более высокую яркость и скорость включения/выключения. В настоящее время в таких источниках начинают использовать автоэмиссионные катоды на основе углеродных материалов, в том числе наноструктурных. Результаты проведенных исследований эмиссионных свойств различных углеродных материалов показывают перспективность их использования в качестве автоэмиттеров [1]. Применение автоэлектронной эмиссии позволяет расширить диапазон рабочих температур, уменьшить инерционность, увеличить срок службы и улучшить экологичность катодолюминесцентных источников.

Углеродные материалы, которые используются в качестве автоэмиттеров, делятся на несколько групп (см. таблицу). Такое деление условно, и в его основе лежит способ получения углеродного материала. Углерод может находиться в различных формах, например аморфный углерод [2], фуллерены [3], нанотрубки [4]. В основном получаемая структура и её свойства определяются методом и технологическими параметрами производства.

ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Автоэмиссионные свойства катода из графита определяются в основном параметрами микровыступов на его эмитирующей поверхности. Поэтому при изучении эмиссионных свойств автокатодов различных типов сопоставляются автоэмиссионные свойства и структура поверхности. В работах [5,6] исследовалась шероховатость поверхности высокопрочного графита. Под шероховатостью понимается величина, обратная среднему радиусу закругления микровыступа, форми-

А.Лейченко, Е.Шешин, д.ф.-м.н.,
А.Щука, д.т.н.

рующего поверхность автокатада. В [5,6] приведены качественные результаты, показывающие существенное влияние шероховатости поверхности автокатада на величину эмиссионного тока. Шероховатость у высокопрочных графитов, в частности МПГ-6, можно изменять за счет различных видов температурной и механической обработки поверхности катода. Кроме этого, эффективным методом улучшения эмиссионных свойств является тренировка (формовка) автокатада [7]. Отмечено, что после формовки микроструктура рабочей поверхности, а следовательно, и стабильность эмиссионного тока релаксирует к некоторому оптимальному значению, которое определяется микроструктурой исходного графита, рабочей площадью, требуемым токоотбором и расстоянием анод-катод.

Один из перспективных методов улучшения автоэмиссионных свойств углеродных материалов – радиационная обработка их поверхности низкоэнергетическими ионами в плазме коронного разряда [8]. Проведенные эксперименты показали, что радиационная обработка позволяет получить развитые поверхности углеродных материалов с большим числом центров эмиссии.

Автоэлектронная эмиссия с пирографита крайне анизотропна. Эксперименты по изучению эмиссионных свойств пирографита показали, что максимальное значение автоэлектронной эмиссии с него можно получить с торцов пирографитовых пластин, в то время как с их плоскости практически не наблюдается эмиссии.

В работах [9,10] показано, что предельный ток автокатодов из пирографита возрастает с увеличением температуры термической обработки углеродного материала, под действием которой происходит изменение его структуры. Уровень нестабильности автоэлектронного тока для всех образцов был постоянным при малых токах (до 1–10 мкА) и уменьшался с ростом тока при его больших (более 1 мА) значениях. Самое меньшее значение нестабильности (около 9%) при токах менее 1 мкА имели автокатоды из пирографита толщиной 30 мкм с температурой обработки 2000°C. Самая большая нестабильность была у катодов с термической обработкой

Типы углеродных материалов

Тип материала	Основные виды
Конструкционные материалы	Высокопрочный графит
	Пироуглерод
	Стеклоуглерод
Углеродные волокна	На основе полиакрилонитрила
	На основе пека
	Пироуглеродные
Углеродные наноматериалы	Аламазоподобные пленки
	Нанотрубки
	Фуллерены

при 2500°C – около 27%. При токах эмиссии 3–6 мА нестабильность для всех образцов составляла 1–2%.

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ

Под *наноструктурой* обычно подразумевают объект, хотя бы один из размеров которого в любом измерении имеет масштаб от 0,1 до 100 нм. Можно выделить следующие типы наноструктур: нанотекстурированные поверхности, у которых только толщина имеет нанометровый масштаб; нанотрубки, или нановолокна, у которых диаметр имеет наноразмеры, а длина много больше; наночастицы, которые имеют наноразмеры во всех трех измерениях. Соответственно считается, что *наноструктурированный* материал или *наноматериал*, – это материал, который состоит из гранул (частиц) с размером от 0,1 до 100 нм или имеет слои или волокна такого же масштаба.

До 1985 года об углероде было известно, что он может существовать в природе в двух аллотропных состояниях: 3D форме (структура алмаза) и слоистой 2D форме (структура графита). В 1985 году была открыта новая – 0D – форма углерода: сферическая структура из 60 атомов углерода [3]. Данные углеродные кластеры стали известны как "бакминстерфуллерены" (buckminsterfullerene) или просто "фуллерены".

В 1991 году Ииджима [4] обнаружил еще одну форму углерода – 1D – продолговатые трубчатые образования, названные углеродными нанотрубками (УНТ). Примерно в это же время российские ученые объявили об открытии нанотрубок и их связок [11], имеющих, однако, намного меньшее отношение длины к диаметру и напоминавших скорее вытянутые фуллерены.

В настоящее время синтезировано огромное количество различных модификаций углеродных наноструктур: фуллерены, однослойные и многослойные нанотрубки, углеродные нити, пучки, пряжи, жгуты, рулоны, конуса, рожки, луковицы, тороиды, графеновые нановолокна и т. д.

Для синтеза углеродных наноструктур используют три основных метода: термическое разложение графита в дуговом разряде, химическое осаждение из газовой фазы с использованием катализатора, лазерное испарение графита. Возможны также сочетания нескольких методов в одном процессе.

Эмиссионные свойства углеродных наноструктур. Практически сразу с момента обнаружения углеродных нанотрубок в 1991 году [4] было показано, что они обладают уникальными эмиссионными свойствами. Например, в работе [12] приведены результаты исследований эмиссионных свойств как одиночных нанотрубок, так и пленок, состоящих из нанотрубок. Показано, что эмиссионные свойства и время деградации образца зависят от структуры нанотрубок. Одностенные нанотрубки деградировали быстрее, чем многостенные. Рабочие напряжения катодов на основе нанотрубок меньше по сравнению с другими углеродными катодами. Авторы [12] полагают, что это связано со значительным усилением напряженности электрического поля на вершинах нанотрубок за счет их малых радиусов закруглений.

В настоящее время существует огромное количество публикаций об автоэмиссионных свойствах различных углеродных наноструктур (см. обзор [13]). Почти во всех работах отмечается несоответствие экспериментальных данных о геометрической форме и о параметрах автоэлектронной эмиссии (плотность эмиссионного тока, пороговое поле) теоретическим расчетам, полученным при использовании простейшей модели эмиттера для металлического острия. Получаемые на основе такой модели значения коэффициента усиления поля (определяемого как отношение напряженности поля в эмиссионном центре, необходимой для автоэмиссии, к напряжению между катодом и анодом), возможны только в случае, если размер эмитирующей области сравним с размером атома. Такое, по мнению исследователей, возможно, если под действием сильного электрического поля на конце УНТ образовалась цепочка из атомов углерода. Попытки объяснить описанное несоответствие за счет более тщательного учета распределения поля и плотности заряда для эмиттеров нанометрового размера не привели к какому-либо определенному результату.

УГЛЕРОДНЫЕ ВОЛОКНА

Первые эксперименты по автоэмиссии углеродных волокон [14] проводились на образцах из вязких волокон. Позднее были изучены эмиссионные свойства стеклоуглеродных волокон [15]. Однако наиболее распространенным объектом исследования являются полиакрилонитрильные (ПАН) волокна [15].

Автоэмиссионный катод (АЭК) на основе полиакрилонитрильного углеродного волокна наиболее стабилен для работы в техническом вакууме [16] (под "техническим вакуумом" здесь и далее подразумевается уровень вакуума, типичный для электровакуумных приборов: 10^{-4} – 10^{-6} Торр). Эмиссионными центрами у такого автокатада являются многочисленные (~ 10^5) микровыступы, образованные выходящими на торцевую поверхность волокна фибриллами и их совокупностями. При работе АЭК разрушение отдельных микровыступов

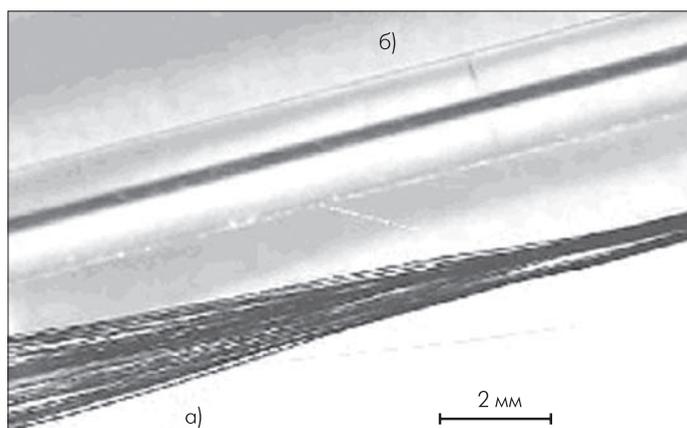


Рис. 1. Пучок полиакрилонитрильных углеродных волокон до (а) и после (б) стеклования

не приводит к существенному изменению эмиссионного тока, так как среднее число микровыступов во время работы автокатода остается постоянным. Этот факт и определяет высокую стабильность эмиссионного тока и большой срок службы АЭК в условиях технического вакуума. Катоды из углеродных волокон без существенной деградации эмиссии выдерживают вакуумные пробои, что недопустимо для подавляющего большинства других типов автоэлектронных катодов.

Наработка катода на основе пучка углеродных волокон составила 7,5 тыс. часов при токе 50 мкА [17].

Изготовление катода из углеродных волокон представляет значительные трудности вследствие малых поперечных размеров волокна ($\varnothing \sim 7$ мкм). Поэтому использование катода на основе одиночного волокна не технологично и не дает существенного улучшения эмиссионных свойств и надежности катода [1].

Один из перспективных методов крепления пучка углеродных волокон – остекловка [18]. Пучок полиакрилонитрильных углеродных волокон заключают в диэлектрическую оболочку из стекла марки С-93 (рис.1). Внешний диаметр стеклянной оболочки – 2 мм; внутренний – порядка 0,18 мм; пучок состоит из 350–400 углеродных волокон; средний диаметр волокна – 7 мкм.

Операция остекловки позволяет изготавливать катоды с пучком волокон, ориентированным вдоль оси электронно-оптической системы и расположенным строго по центру катода при отсутствии механических нагрузок на волокна. Кроме того, остекловка пучка углеродных волокон повышает вибрационную стойкость автоэлектронного катода, обеспечивает ориентацию волокон и возможность механического крепления катода.

В работах [19,20] изучалась эмиссия заостренных волокон. В большинстве случаев заострение проводилось путем травления в электролите. Такая методика позволяет получить ровную поверхность с большим числом рабочих микровыступов. Однако в первые же часы работы такого катода в условиях высокого технического вакуума происходит разрушение его поверхности под действием ионной бомбардировки. Та-

ким образом, при работе в высоком техническом вакууме заострение волокон теряет свое значение.

Существенно лучшие результаты по стабилизации тока автокатода из углеродных волокон дает применение методики предварительной токовой тренировки (формовки). В работах [21,22] такая методика впервые применена для стабилизации тока стержневых графитовых катодов. О применении формовки для фибрильных волокон впервые упоминается в [23]. Формовка заключалась в работе катода при постоянном токе ≈ 100 мкА в течение 5 ч, при этом давление остаточных газов составляло 10^{-7} Торр. Применяемая методика была одноступенчатой и, по утверждению авторов, позволила стабилизировать положение вольт-амперной характеристики и снизить флуктуации эмиссионного тока. В дальнейших работах, например [24], рассматривалась многоступенчатая формовка. Физическое обоснование процесса формовки состоит в том, что при токовой тренировке происходит разрушение нестабильных участков углеродного волокна и выделение "скелетной" структуры.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ

Одним из основных свойств автокатодов из углеродных материалов, определяющих возможность их практического использования, является стабильность эмиссии в условиях технического вакуума. Под термином "стабильность" подразумевается отсутствие флуктуаций автоэлектронного тока и необратимых изменений эмиссии, которые могли бы заметно повлиять на сокращение срока службы автоэлектронного катода.

Одна из причин, приводящих к ухудшению эмиссии или даже гибели эмиттера, – вакуумная дуга, возникающая из-за наличия остаточных газов или из-за распыления материала катода при значительном эмиссионном токе. Это явление наблюдается в условиях, при которых электрическое поле становится выше некоторого критического значения. В данном случае в системе может даже возникнуть дуговой или искровой разряд, результатом которого станет необратимое разрушение материала катода [1].

Другая причина нестабильности в работе АЭК связана с бомбардировкой эмиттера положительными ионами остаточных газов. Электроны, эмитируемые катодом при своем движении к аноду, ионизуют атомы остаточных газов, а также атомы и молекулы различных веществ, выделяющихся из стекла и электродов прибора. Образующиеся при этом положительные ионы, ускоряясь в электрическом поле, движутся к эмиттеру и бомбардируют его, обладая значительной средней энергией, определяемой напряжением между анодом и катодом [1].

Еще один существенный фактор, влияющий на деградацию АЭК, – это разогрев эмиттера Джоулевым теплом. Учет влияния разогрева током особенно важен при рассмотрении наноразмерных эмиттеров. Поскольку S – площадь контакта

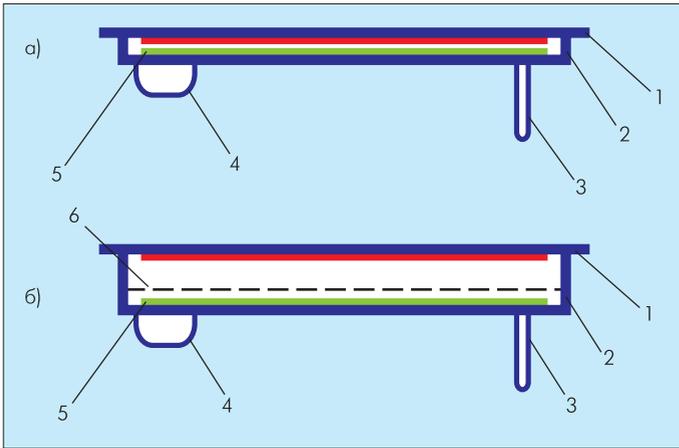


Рис.2. Плоские источники света: а – диодная конструкция прибора; б – триодная конструкция прибора. 1 – анод, покрытый слоем люминофора; 2 – стекланный спейсер (толщина от десятков микрометров до единиц миллиметров); 3 – штенгель; 4 – геттерный объем; 5 – плоский автокатод; 6 – модулятор (обычно металлическая сетка)

эмиттера с подложкой – составляет всего несколько десятков квадратных нанометров, то сопротивление такой системы $\sim 1/S$ – весьма существенно. При этом в условиях вакуума основной отвод тепла осуществляется через подложку и количество отводимого тепла невелико. Совокупность этих факторов приводит к существенному разогреву отдельных эмиссионных центров [1]. Подобный сильный локальный разогрев (до температур порядка 2000 К) наблюдался при автоэлектронной эмиссии из нанотрубок. При таких температурах происходит уже не автоэлектронная, а термоавтоэлектронная эмиссия [25]. УНТ в этих условиях может быстро разрушаться (испаряться), что приводит к исчезновению данного эмиссионного центра.

Следует также отметить механическое воздействие поля на свойства автоэмиссионных катодов на основе нанотрубок. Известно, что углеродные нанотрубки в электрическом поле стремятся сориентироваться по полю под действием пондеромоторных сил. В результате переориентации увеличивается коэффициент усиления поля. Однако, помимо этого полезного с практической точки зрения эффекта, также наблюдается и негативный эффект – резкое ослабление механического и электрического контакта нанотрубки с подложкой.

Однако наибольшее влияние на стабильность автоэмиссионного тока оказывает модификация поверхностных свойств катода при адсорбции на нем атомов остаточных газов и их

десорбции под действием ионной бомбардировки. Можно отметить, что лишь адсорбция кислорода и паров воды оказывает существенное влияние на электронные свойства трубки. При этом молекулы кислорода увеличивают значения потенциала ионизации (работы выхода), а молекулы воды, наоборот, уменьшают.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что, несмотря на внушительное количество экспериментальных данных, в настоящее время вопрос о стабильности эмиссионного тока АЭК из различных нанокристаллических материалов остается открытым. Неясно, в каких условиях и какие именно факторы определяют стабильность работы того или иного катода. Из-за большого количества факторов и их сложного влияния на процесс автоэлектронной эмиссии окончательной модели, описывающей деградацию и флуктуации эмиссионного тока, нет. Изучение стабильности эмиттеров и определение влияющих на нее факторов необходимы для определения оптимальных режимов работы таких катодов.

ИСТОЧНИКИ СВЕТА С АВТОКАТОДОМ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Основные направления в развитии источников света с автокатадами на основе углеродных материалов – это создание плоских источников света с пленочными катодами, пальчиковых катодолюминесцентных ламп, источников света с аксиальной конструкцией.

Плоские источники света. Основным конструктивным отличием плоских источников света (рис.2) является большая площадь анода (катода) и малое расстояние между катодом и анодом по сравнению с линейными размерами катодной подложки.

При соответствующей технологии производства плоских электровакуумных приборов можно разработать источник света площадью более 500 см². Такие приборы могут иметь диодную или триодную конструкцию. Триодная конструкция предпочтительнее для создания сверхъярких источников света. В плоских источниках света небольшой яркости (1000–5000 кд/м²) применяется диодная конструкция, что значительно упрощает производство вакуумного прибора. Такие приборы могут быть использованы, например, в подсветке жидкокристаллических экранов [26].

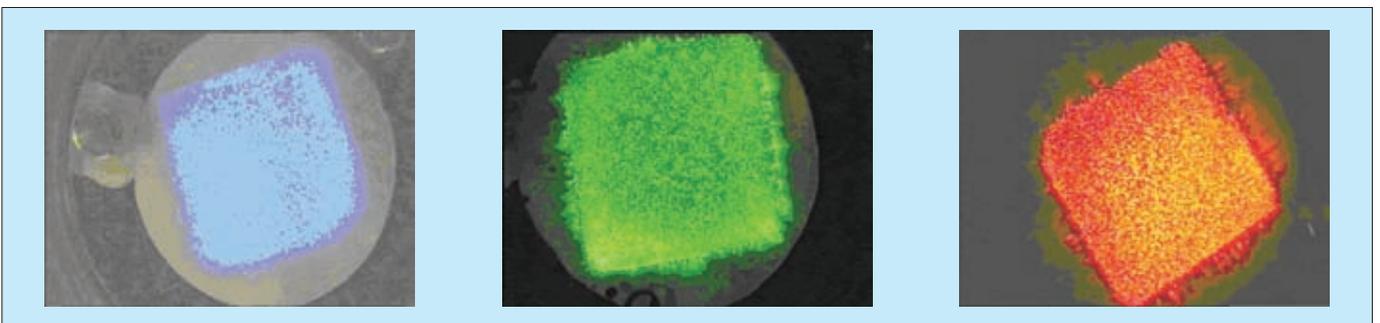


Рис.3. Прототипы плоского автоэмиссионного светодиода (с различными люминофорами)

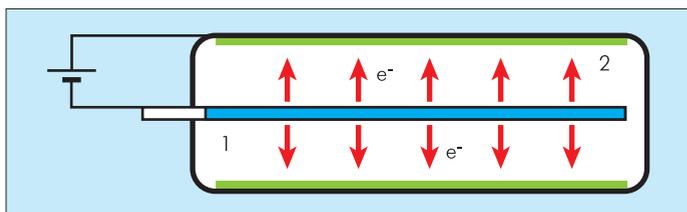


Рис.4. Конструкция аксиального источника света: 1 – центральная часть с катодной структурой; 2 – цилиндрический анод с люминесцентным покрытием

Автокатоды для плоских приборов можно изготавливать различными методами, например трафаретной печатью или электрофоретическим осаждением. В качестве наносимого материала целесообразно использовать углеродные порошки, полученные при помощи различных технологий. Кроме этого могут быть применены механические способы обработки массивной углеродной заготовки для создания плоского автоэмиссионного катода большой площади.

Прототип плоского автоэмиссионного диодного источника света (рис.3), катод которого был изготовлен из наноструктурного углерода на основе ориентированных нанотрубок и наноразмерных углеродных кристаллитов, был разработан авторами работы [27]. Представленный образец толщиной 3 мм обладал равномерной яркостью 500 кд/м² на площади 25×25 мм.

Источники света с аксиальной конструкцией. В аксиальной конструкции (рис.4) может использоваться как пленочный катод, так и катод на основе волокон.

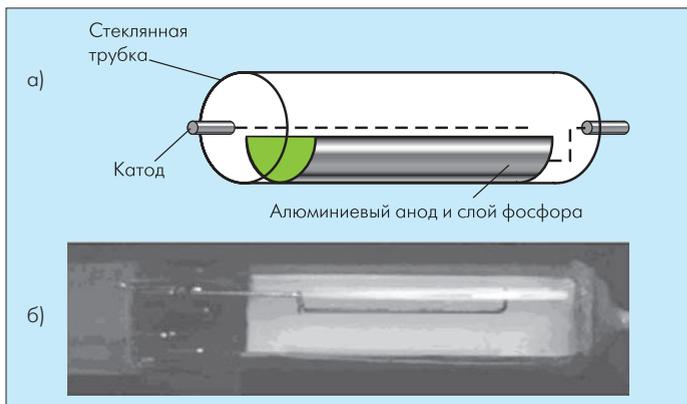


Рис.5. Цилиндрическая лампа диодной конструкции с катодом из наноструктурного углерода: а – конструкция; б – внешний вид

В настоящее время исследуется работоспособность источников света с катодами на нанотрубках [28,29]. Прототип такого люминесцентного диода представлен в работе [29] (рис.5). В качестве материала для катода использовалась никелевая проволока толщиной 1 мм, покрытая наноструктурным углеродом. Катод располагался соосно 20-мм цилиндрической стеклянной трубке, на половину внутренней поверхности которой напылена алюминиевая пленка (анод), а поверх алюминия нанесен слой люминофора. Яркость диода достигала 100 000 кд/м² при анодном напряжении 10 кВ и токе 300 мкА. Световой поток такого источника света составил 150–200 лм при световой эффективности 25–30 лм/Вт.

В аксиальном источнике света триодной конструкции (рис.6) соосно расположены цилиндрический анод (в виде стеклянной колбы с нанесенным люминесцентным покрытием), модулятор (управляющий электрод в виде цилиндрической сетки) и продолговатый катод, конструкция и материал которого могут быть любыми.

Пальчиковые катодолюминесцентные лампы [30–32]. Пальчиковая катодолюминесцентная лампа (рис.7) по своей конструкции является наиболее ярким источником света. В этой конструкции можно реализовать напряжение между катодом и анодом до 10–15 кВ и ток до 1 мА. Яркость таких ламп может достигать 100 000 кд/м² и более. Область их применения – элементы видеозэкранов среднего и малого разрешения.



Рис.6. Аксиальный источник света триодной конструкции

Один из вариантов пальчиковой лампы – катодолюминесцентный триод с автокатодом на основе пучков углеродных волокон. Катод такого прибора состоит из нескольких пучков ПАН углеродных волокон по ~100 волокон в каждом и дает стабильный эмиссионный ток до 1 мА при хорошей равномерности засветки люминесцентного анода.

Еще один вариант – яркая катодолюминесцентная лампа триодной конструкции с автокатодом на основе нанотрубок (рис.8). Яркость по зеленому цвету для этого источника света составляет 60 000 кд/м² (при анодном токе 200 мкА). В более позднем варианте источника света аналогичной конструкции яркость излучения достигает уже 1 000 000 кд/м², а световой поток составляет 1000 лм. Такая яркость была получена при постоянном токоотборе на уровне 400 мкА и ускоряющем напряжении 30 кВ. При таких ускоряющих напряжениях и выделяемой мощности источник света оснащают экранировкой от рентгеновского излучения (свинцовое стекло) и системой отвода тепла.

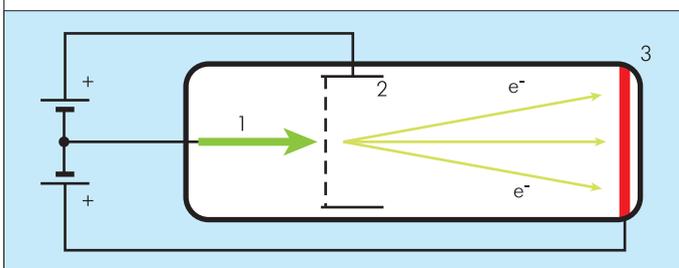


Рис.7. Схематическая конструкция катодолюминесцентной пальчиковой лампы: 1 – катод; 2 – управляющий электрод; 3 – люминесцентный анод

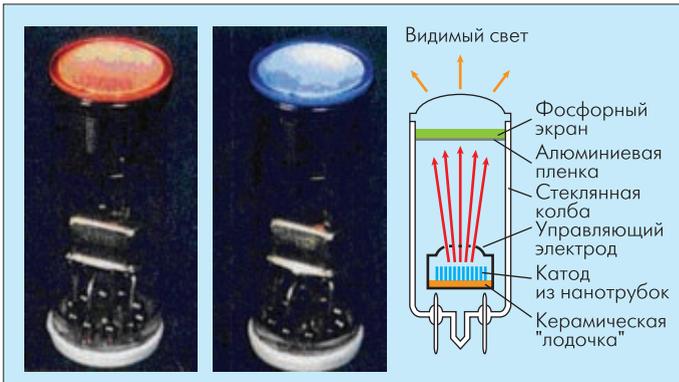


Рис.8. Катодолюминесцентная пальчиковая лампа с автокатодом из нанотрубок

Источники света, разработанные в лаборатории авторов (на кафедре вакуумной электроники МФТИ).

Для определения эмиссионных свойств и отработки технологии изготовления катодов было изготовлено более 100 катодолюминесцентных ламп триодной конструкции с катодом из ПАН-волокон (рис.9). Были исследованы световые и эмиссионные характеристики опытной партии этих источников света на предмет разброса параметров катодов, а также их работа в прототипе модуля видеоэкрана.

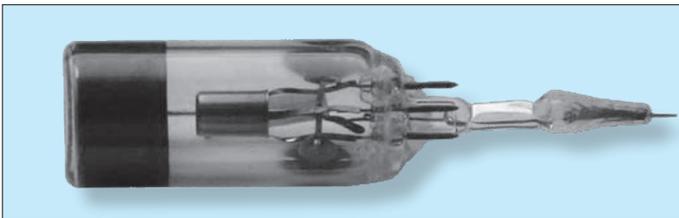


Рис.9. Катодолюминесцентная лампа триодной конструкции с автоэлектронным катодом

Исследование светоэлектрических характеристик ламп проводилось на подготовленном специализированном измерительном стенде, с помощью которого были получены данные о спектре излучения ламп, их яркости и световой эффективности (рис.10, 11).

Для каждой лампы из тестовой партии были сняты по четыре вольт-амперные характеристики (снималась зависимость автоэмиссионного тока катода I_K от напряжения на модуляторе при фиксированном анодном напряжении $U_A = 7, 8, 9, 10$ кВ) (рис.12).

Исходя из полученных экспериментальных данных по вольт-амперным характеристикам каждой катодолюминесцентной лампы (рис.13), следует отметить несколько моментов.

Во-первых, вольт-амперные характеристики всех светоизлучающих пальчиковых ламп из тестовой партии лежат в области управляющих напряжений $U_M [I_{K \max} = 100 \text{ мкА}] < 1500$ В (см. рис.13).

Во-вторых, вольт-амперные характеристики катодолюминесцентных ламп не смещены в область отрицательных управляющих напряжений, а наоборот, при некотором положительном потенциале на модуляторе автоэмиссионный ток еще практически отсутствует: $U_M [I_{K \min} < 0,5 \text{ мкА}] > 500$ В.

В-третьих, очевидно, что существует заметный разброс по величинам управляющих напряжений модулятора $\Delta U_M [I_{K \max} = 100 \text{ мкА}] \sim 300\text{--}400$ В (см. рис.13). Видимо, такой разброс характеристик связан с комплексом технических причин: неточность установки катода в держатель, неточность выставления расстояния модулятор-анод в процессе запайки вакуумной оболочки лампы, небольшой разброс длин пучков углеродных волокон, а также различное количество волокон в пучке для каждой лампы.

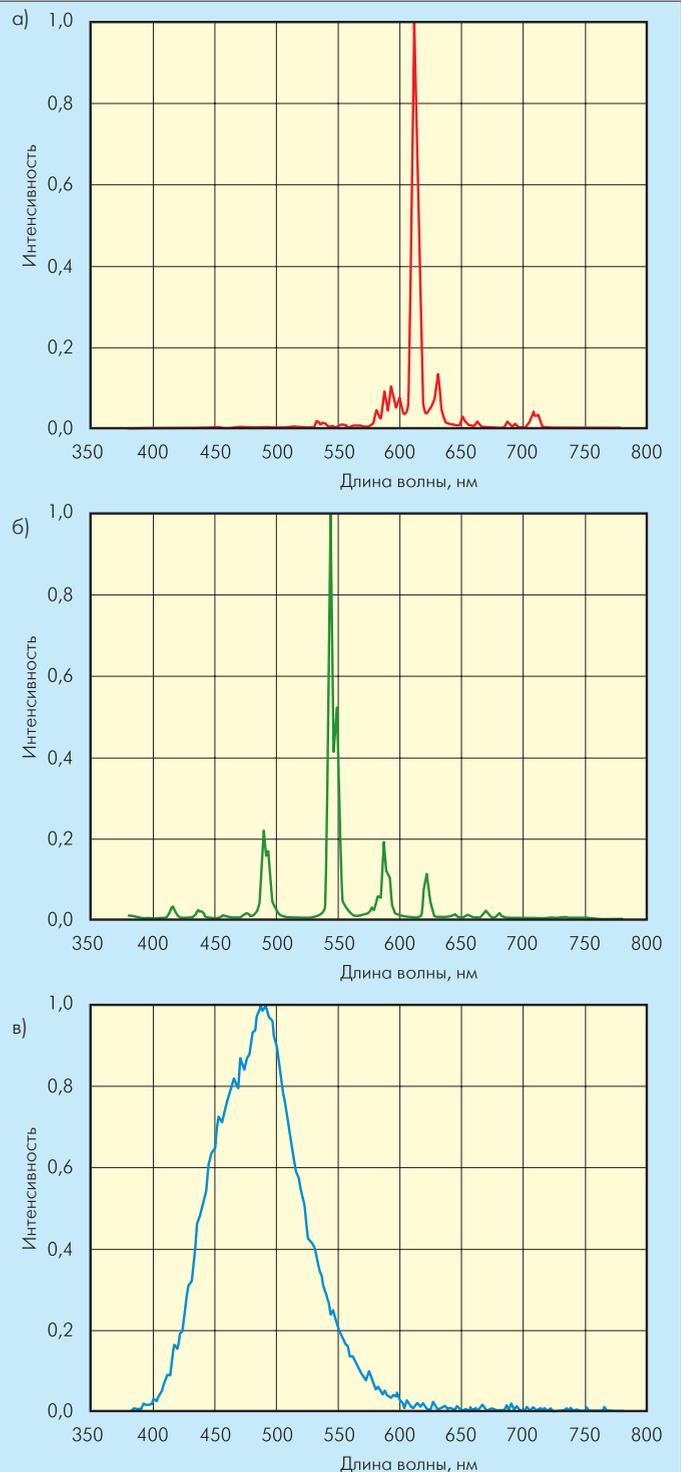


Рис.10. Спектр излучения лампы красного (а), зеленого (б) и синего (в) цвета

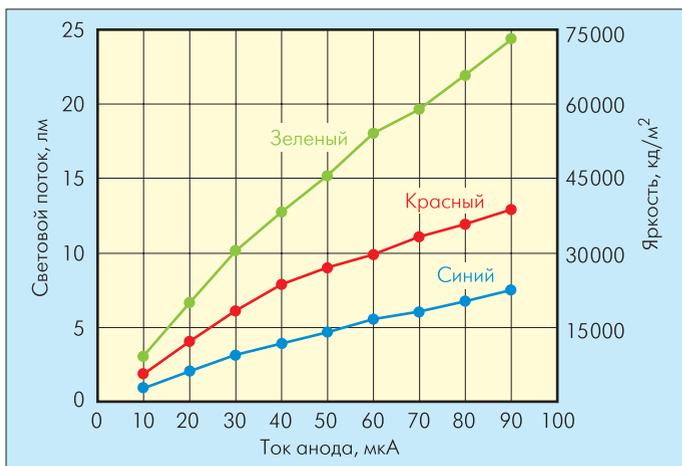


Рис. 11. Зависимость яркости излучения и светового потока пальчиковой лампы от величины автоэмиссионного тока

На основе данных лампы были созданы элементы видеоэкранов.

Перспективные области применения источников света с автокатодом. Спектр применения катодолюминесцентных источников света с АЭК широк. Это, в частности:

- Осветительные лампы (рис.14а).
- Элементы подсветки ЖК-дисплеев (рис.14б).
- Плоские автоэмиссионные экраны (Field Emission Display – FED).
- Пиксели больших видеоэкранов коллективного пользования (рис.14в).
- Светофоры и семафоры.
- Источники резервного освещения.
- Сигналы спасения на воде и в горах.
- Любые источники света высокой яркости с возможностью подбора спектра излучения.

Катодолюминесцентный источник света позволяет получить излучение видимого диапазона, спектральный состав которого благоприятен для визуального восприятия и не вызывает такой утомляемости глаз, как большинство известных источников света. В катодолюминесцентных излучателях от-

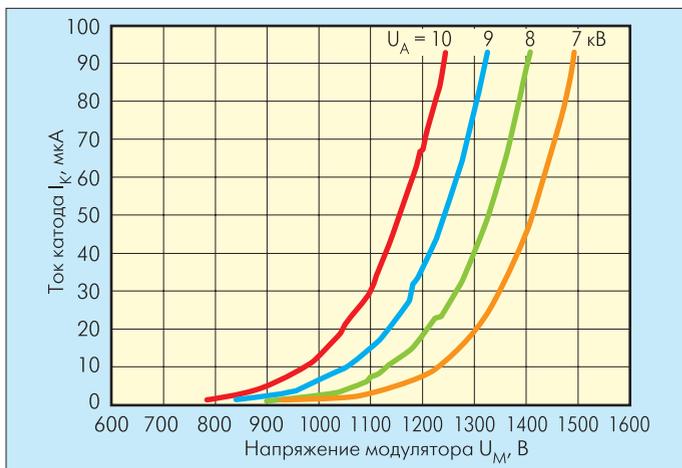


Рис. 12. Типичная вольт-амперная характеристика лампы из тестовой партии. Зависимость автоэмиссионного тока I_K катода от напряжения на управляющем электроде U_M при фиксированных напряжениях на аноде $U_A = 7, 8, 9, 10$ кВ

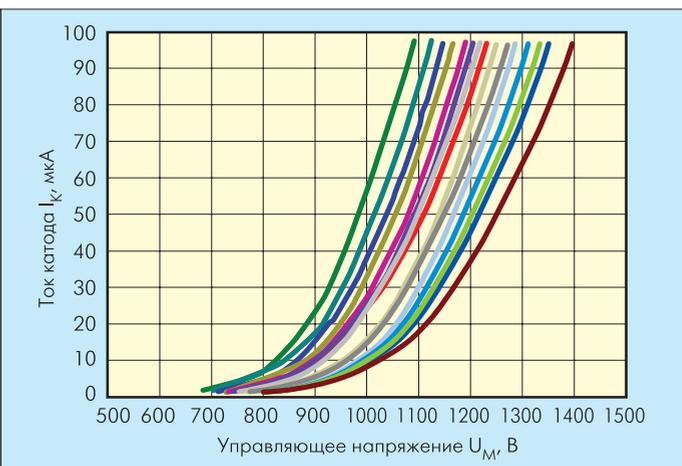


Рис. 13. Вольт-амперные характеристики различных ламп из тестовой партии. Зависимость автоэмиссионного тока I_K катода от напряжения на управляющем электроде U_M при напряжении на аноде $U_A = 10$ кВ

сутствует вредное инфракрасное и ультрафиолетовое излучение.

Свет от катодолюминесцентных источников можно получить диффузным или направленным в необходимый телесный угол для таких специальных применений, как видеоэкраны коллективного пользования.

Катодолюминесцентные лампы с автокатодом в своем составе не имеют ядовитых материалов и газов, вредных для здоровья человека. Для таких источников света не существует проблем производства и утилизации вышедших из строя ламп, связанных с загрязнением окружающей среды, как, например, для люминесцентных ламп, в которых имеются пары ртути.

К числу достоинств источников света на основе автоэмиссии относятся также низкая потребляемая мощность, высокое быстродействие, малые габариты и вес, высокая радиаци-

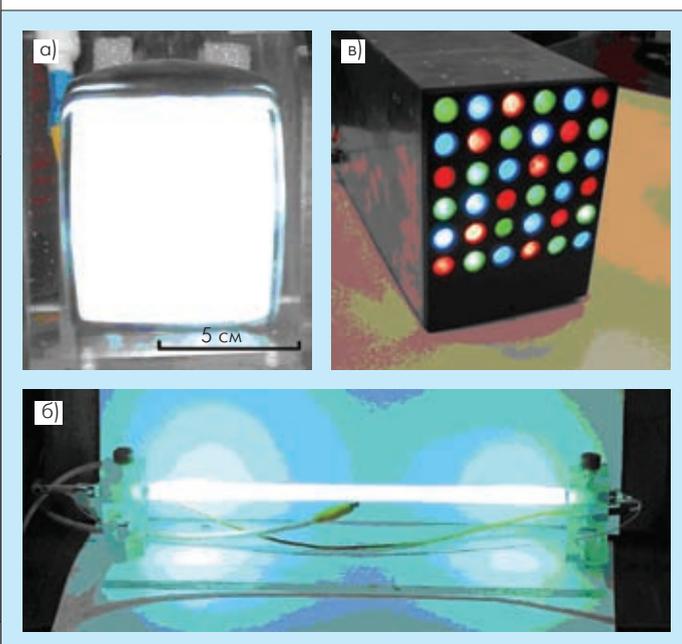


Рис. 14. Перспективные источники света на основе автокатодов из углеродных материалов: а – осветительная лампа; б – лампа для подсветки ЖК дисплея; в – пиксели больших видеоэкранов

онная стойкость, малая материалоемкость и достаточно низкая стоимость изготовления.

Перечисленные преимущества излучателей с автокатодом позволяют эффективно использовать их в вышеуказанных приложениях и других областях техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. – М.: МФТИ, 2001.
2. Silva S.R.P., Forrest R.D., Khan R.U. Tailoring of the field emission properties of hydrogenated amorphous carbon thin films by nitrogen incorporation and thermal annealing. – *Diamond and Related Materials*, 2000, 9, 1, p. 1205–1209.
3. Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C. et al. C₆₀: Buckminsterfullerene. – *Nature*, 1985, v.318, p.162.
4. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. – *Nature*, 1991, v.354, p.56.
5. Бондаренко Б.В., Макуха В.И., Рыбаков Ю.Л. и др. Влияние шероховатости поверхности автокатодов на их эмиссионные характеристики. – *Радиотехника и электроника*, 1987, т. 32, №12, с.2606–2610.
6. Бондаренко Б.В., Макуха В.И., Шешин Е.П. Модель микрорельефа автокатада с развитой рабочей поверхностью. – В кн.: *Физические явления в электроприборах*. – М.: МФТИ, 1986, с.18–21.
7. Бондаренко Б.В., Шешин Е.П. и др. Исследование эрозии углеродных автокатодов в камере РЭМ. – *Электронная техника. Сер.4. ЭРГП*, 1986, №3, с. 8–12.
8. Суворов А.Л., Шешин Е.П., Простасенко В.В. и др. Микрошероховатые плоские автоэмиссионные катоды из графита, полученные радиационным способом. – *ЖТФ*, 1996, т.66, №7, с.156–160.
9. Бондаренко Б.В., Ильин В.Н., Шешин Е.П. и др. Эмиссионные характеристики автокатодов из пластин пирографита. – *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, 1988, №1, с.34–38.
10. Ильин В.Н., Шомин Д.А., Погорелова В.И. Автоэлектронная эмиссия пирографита. – Тезисы докладов XX Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике. – Киев, 1987, т.1, с.235.
11. Косаковская З.Я., Чернозатонский Л.А., Федоров Е.А. Нановолоконная углеродная структура. – *Письма в ЖЭТФ*, 1992, т.56, вып.1, с.26-30.
12. Gulyaev Yu.V., Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z. Ja. et al. Field emitter arrays on nanotube carbon structure films – *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1995, v.13, p. 435–436.
13. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки. – *Успехи физических наук*, 1997, т.167, №9, с.945–972.
14. Baker F.S., Osborn A.R., Williams J. The carbon fiber filed emitter. – *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 1974, v.7, 15, p. 2105–2115.
15. Watt W. Production and properties of high modulus carbon fibres. – *Proceedings of the Royal Society A319* (1970) № 1536, p. 5.
16. Углеродные волокна и углекомпозиаты. /Под ред. Фитцера Э. – М.: Мир, 1988.
17. Бондаренко Б.В., Макуха В.И., Шешин Е.П. Стабильность эмиссии и долговечность некоторых вариантов автокатодов. – *Радиотехника и электроника*, 1983, т.28, № 8, с.1649.
18. Baturin A.S., Eskin I.N., Trufanov A.I. et al. Electron gun with field emission cathode of carbon fiber bundle. – *J. Vac. Sci. Technol.*, 2003, v. B21, №1, p. 354–357.
19. Baker F. S., Osborn A.R., Williams J. Field emission from carbon fibers: A new electron source. – *Nature*, 1972, v.239, p.96.
20. Colin Lea. Field emission from carbon fibres – *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1973, V. 6, p. 1105–1114.
21. Бондаренко Б.В., Макуха В.И., Рыбаков Ю.А., Шешин Е.П. Автоэлектронная эмиссия стержневых графитовых катодов. – В кн.: *Физические явления в приборах электронной и лазерной техники*. – М.: МФТИ, 1981, с. 11–15.
22. Шешин Е.П., Макуха В.И., Рыбаков Ю.Л. Эмиссионные свойства стержневых автокатодов из графита. – В кн.: Тезисы докладов 18 Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике. – М.: Наука, 1981, с.210.
23. Бондаренко Б.В., Рыбаков Ю.Л., Шешин Е.П. Автоэлектронная эмиссия углеродного волокна. – *Радиотехника и электроника* 27, 1982, № 8, с.1593.
24. Макуха В.И., Шешин Е.П. О возможности получения больших автоэмиссионных токов из графита. – В кн.: *Физические явления в приборах электронной и лазерной техники*. – М.: МФТИ, 1983, с.22.
25. Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1958.
26. Батурин А.С., Чадаев Н.Н., Шешин Е.П. и др. Разработка лампы подсветки для гидрокристаллических экранов. – В кн.: Тезисы докладов 9 НТК "Современное телевидение". – М., 2001, с. 21–23.
27. Obratsov A.N., Pavlovsky I.Yu., Volkov A.P. Prototype of Light Emitting Device with Thin Film Cold Cathode. – In: *Proceedings of the 19th Int. Display Research Conf.*, 1999, p. 229–231.
28. Arfaoni I. et al. Toward lighting devices and flat panel displays based on carbon nanotube field emitter. – In: *IVESC'02, PROC.*, p. 139.
29. Obratsov A.N., Volkov A.P., Zakhidov A.I.A. et al. Field emission characteristics of nanostructured thin film carbon materials. – *Applied Surface Science*, 215, 2003, p. 214–221.
30. Гуляев Ю.В., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В. и др. Автоэлектронная эмиссия с углеродных нанотрубных и нанокластерных пленок. – *Радиотехника и электроника*, 2003, т.48, №11, с.1399–1406.
31. Сеницын Н.И., Гуляев Ю.В., Глухова О.В. и др. Исследование возможностей построения новых вакуумных индикаторов и дисплеев на основе углеродных нанотрубных и нанокластерных автокатодов. – *Радиотехника*, 2005, №4, с.35–40.
32. Гуляев Ю.В., Елесин В.Ф., Сеницын Н.И. и др. Катодолюминисцентные источники света на основе автоэлектронной эмиссии: концепция практической реализации. – *Светотехника*, 2000, №1, с.1014.