56

Институт теоретической и
экспериментальной физики

FERMILAB
MAR 22 1999
LIBRARY

25-98

ITEP-25-98

А.Л.Суворов, А.Ф.Бобков, С.В.Зайцев,
М.О.Попов, Е.Н.Скороходов, Е.В.Давыдов

КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ, ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА НА ОСНОВЕ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ МАТЕРИАЛОВ

(КРАТКАЯ ИСТОРИЯ, НЕМНОГО ФИЗИКИ, СЕГОДНЯШНЯЯ СИТУАЦИЯ, ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ, ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ)

Fermilab Library
0 1160 0062345 8

Москва 1998

УДК 628.9 М-16

«КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ, ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА НА ОСНОВЕ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ МАТЕРИАЛОВ (Краткая история, Немного физики, Сегодняшняя ситуация. Вопросы и проблемы, Возможности и перспективы)»* : Препринт ИТЭФ 25-98/
А.Л.Суворов, А.Ф.Бобков, С.В.Зайцев, М.О.Попов, Е.Н.Скороходов, Е.В.Давыдов
- М., 1998 – 53с.

Изложена сложившаяся на сегодняшний день ситуация в деле разработки и создания катодолюминесцентных источников света, использующих для получения бомбардирующих люминофор электронов явление автоэлектронной эмиссии. Последовательно рассмотрены: история вопроса, основные конструкции источников света, их принципиальные возможности и сравнительные характеристики, перспективные области применения. Даны основные представления о физике процессов, определяющих работу и ограничения катодолюминесцентных источников света – прежде всего о явлениях автоэлектронной эмиссии и люминесценции. Проанализирована роль различных элементов и узлов источников света в достижении наивысших эксплуатационных параметров. Описаны уже созданные конструкции, приведены их параметры, указаны некоторые недостатки. Сформулированы вопросы, оставшиеся до сих пор без ответа, Намечены видимые пути развития работ в рассматриваемой области.

«CATHODE LUMINESCENT, HIGHLY EFFECTIVE, ECOLOGICALLY PURE LIGHT SOURCES BASED ON THE PHENOMENA OF FIELD ELECTRON EMISSION OF MATERIALS (Short history, A bit of physics, Nowadays situation, Questions and problems, Capabilities and perspectives)»
A.L.Suvorov, A.F.Bobkov, S.V.Zaitsev, M.O.Popov, E.N.Skorokhodov, E.V.Davydov

Modern situation with cathode-luminescent light sources, utilizing field electron emission phenomenon to produce electrons that bombard luminophor, design and creation is stated. The following points are studied consecutively: a history of the question, basic constructions of the light sources, their principal capabilities and comparative properties, promising fields of utilization. A picture of the basic physical processes, determining operation and limitation of the cathode-luminescent light sources – first of all field electron emission and luminescence phenomena – is presented. A role of various elements and parts of the light sources in an attainment of the highest operational parameters is analyzed. Already produced constructions are described; their parameters are presented, some disadvantages are pointed out. Questions that still have no answers on are formulated. Visible ways of the activity development in the field being examined are outlined.

Рис. – 29, список лит. – 95 наим

© Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, 1998

---

* В основу этого препринта положена статья А.Л.Суворова, написанная по заказу Главного Редактора журнала «Светотехника» профессора Ю.Б.Айзенберга. В настоящем варианте статья существенно расширена, в том числе и за счет дополнения некоторыми результатами, полученными совместно или раздельно ее авторами.

1. ВВЕДЕНИЕ.

1.1. Краткая история. Целью написания настоящей статьи является обзор состояния работ (в том числе выполненных при участии группы вакуумной микроэлектроники Лаборатории радиационной физики твердого тела ГНЦ РФ Института теоретической и экспериментальной физики - авторов этой публикации) по созданию катодолюминесцентных источников света, использующих для получения пучка бомбардирующих люминофор электронов катоды на основе автоэлектронной эмиссии [1,2]. Причем следует подчеркнуть, что именно использование таких катодов, их конструктивные и другие особенности, являются "ноу-хау" разрабатываемых источников света, и именно ряд специфических свойств и параметров таких катодов придает указанным источникам света новые, чрезвычайно полезные качества. И именно эти новые качества превращают относительно мало распространенный класс катодолюминесцентных источников света [3] в весьма перспективный. Поэтому разработка и создание катодолюминесцентных источников света на основе автоэлектронной эмиссии, включающая раздельное и совместное рассмотрение целого ряда основных элементов, нацелена, прежде всего, на создание главного элемента – автоэмиссионного катода. Это, в свою очередь, существенно расширяет спектр областей использования таких разработок, обусловливая их важность не только для светотехники, но и, в не меньшей степени, для вакуумной микроэлектроники [4]. Сказанное, однако, ни в коей мере не отрицает важности рассмотрения при создании источников света указанного типа всех других составных элементов и узлов источников – как раздельно, так и в комплексе, ни в коей мере не преуменьшает ключевого значения других элементов.

Принципиальная конструкция катодолюминесцентных источников света весьма проста; это либо диод (катод – источник электронов и анод – электропроводящее покрытие с люминофором), либо триод (дополнительно – модулятор, в простейшем случае – сетка). Идея создания таких источников возникла, по-видимому, вскоре после появления так называемых «катодных лучевых трубок» (они упоминаются в большинстве книг по электрическим источникам света, опубликованным несколько десятков лет назад [5], о них пишут практически во всех обзорных статьях, посвященных истории развития светотехники [6]); в патентах США, например, эта идея просматривается уже в 1945 году (патент США № 2367130), во многих других, более поздних патентах (патент США № 3189784, 1965 год, патенты США № 3374379 и № 3417199, оба 1968 год, патент США № 4287450, 1981 год и т.д.). Типичен среди подобных решений патент США № 4344017 [7]; его анализ показывает, что основным изменениям подвергается конструкция катодно-модуляторного узла. Это подтверждают и решения группы авторов из МФТИ, предложивших весьма схожие конструкции источников света рассматриваемого типа, но с использованием в них для получения электронов явления автоэлектронной эмиссии [8-10]. Отметим, что в предшествующих решениях (см.,

например, [7]), вид электронной эмиссии, на которой основан катод, вообще не обсуждался. В дальнейшем появилось еще несколько публикаций [11-14], касающихся аналогичных источников света. Причем, если в [11] в качестве автоэмиссионного катода был использован матричный многоострийный катод «спиндтовского» типа, интенсивно разрабатываемый в течение уже примерно 25 лет для плоских дисплейных экранов [15], то во всех остальных работах, включая работы групп МФТИ и ИТЭФ, использовались катоды на основе углеродных волокон [16-21]. При этом, основная идея использования углеродных волокон состояла в том, что имеющая место в условиях технического вакуума (~ 10^{-6} *Торр*) относительно интенсивная бомбардировка рабочей поверхности катода ионами остаточных газов создает и поддерживает в динамическом режиме развитый рельеф, содержащий многочисленные эмитирующие центры высокой кривизны. Дополнительным положительным обстоятельством считалось то, что волокна не требовали специального предварительного заострения, предполагая лишь особый режим предварительного формирования их поверхности. К этому следует добавить, что углеродные волокна в огромных количествах выпускаются промышленностью ряда стран (в том числе и России), что определяет их относительно невысокую стоимость. Наконец, они выпускаются только в виде пучков из сотен и тысяч единичных волокон диаметром 7 ÷ 10 *мкм* каждое, что также рассматривалось как положительное обстоятельство, поскольку позволяло без дополнительных операций создавать «многоэмиттерные» автоэмиссионные катоды.

В заключение этого раздела отметим, что изучению различных аспектов автоэлектронной эмиссии углеродных материалов и, в частности, углеродных волокон, вне взаимосвязи с их использованием в источниках света, было посвящено большое количество работ, начиная с пионерских [22,23], и кончая работами групп в Университете Аль-Карака (Иордания) [24], в МФТИ (например, [25-28]) и ИТЭФ [29]. Описан и ряд автоэмиссионных источников электронов на основе углеродных волокон [30,31].

1.2. Принципиальные конструкции источников света. Принципиальная конструкция катодолюминесцентных источников света весьма проста (см. рис.1). Их основными элементами являются: катод – источник электронов (1 на рис.1), формирующий и управляющий электронным пучком модулятор 2, содержащий люминофор анод 3, вакуумированный корпус 4 и источник питания (в частности, преобразователь сетевого напряжения) 5. Ясно, что работа катода может быть основана на любом виде электронной эмиссии; при этом автоэлектронная эмиссия является, как известно, наиболее эффективным способом получения электронов. Модулятор может быть выполнен разнообразным способом, начиная от простейшего – сеточного. В качестве модулятора возможно использование нескольких сеток; кольцевых, цилиндрических и других электродов; их комбинаций. Существенное значение имеет взаимное расположение катода и модулятора, более того, их конструктивное исполнение взаимосвязано. Поэтому, в общем случае их рассматривают как один элемент – катодно-модуляторный узел 1-2. Конструктивное исполнение анода также может быть различным; как правило, оно определяется общей конструкцией источника света, взаимным расположением и назначением его элементов. На рис.2 схематично показаны три наиболее очевидные конструкции катодолюминесцентных источников света. В первом

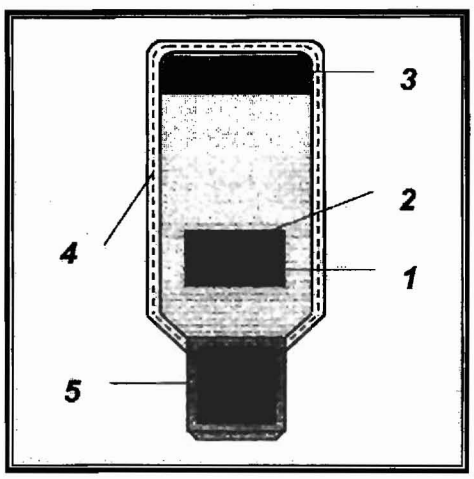

Рис.1. Принципиальная конструкция катодолюминесцентного источника света. Его основные элементы: 1 – катод (источник электронов); 2 – модулятор; 3 – анод, содержащий люминофор; 4 – вакуумированный корпус; 5 – источник (преобразователь) питания.

варианте (схема рис.2а) на стеклянное основание 3 (им может служить часть корпуса источника света) наносится прозрачное проводящее покрытие 4, а на него – люминофор 5. В таком варианте значительная часть создаваемого светового потока расходуется неэффективно (освещаемое источником света пространство расположено на рисунке сверху). Однако, если корпус источника в таком варианте сделать, например, сферическим, расположив в его центре также сферический катод и модулятор (см. ниже, рис.3а,б), то потери света существенно уменьшатся. Второй вариант конструкции предполагает нанесение проводящего покрытия 4" непосредственно на люминофор (схема рис.2б). В этом случае прозрачное покрытие может быть зеркальным, что существенно повышает полезную светоотдачу. Наконец, в третьем варианте (схема рис. 2в) люминофор наносится непосредственно на зеркальную электропроводящую поверхность 4′, тогда как освещаемое пространство находится за катодом (внизу рисунка). Последняя схема наиболее эффективна, так как по сравнению со схемой рис. 2б исключает потери энергии электронов в прозрачном зеркальном слое. Отметим, что правильный подбор параметров прозрачного (точнее – частично прозрачного) проводящего покрытия не менее важен при проектировании и создании катодолюминесцентных источников света, чем выбор параметров других элементов и узлов.

1.3. Принципиальные возможности. Параметры катодолюминесцентных источников света определяются, в первую очередь, характеристиками используемого в них люминофора, а также эффективностью катодно-модуляторного узла.

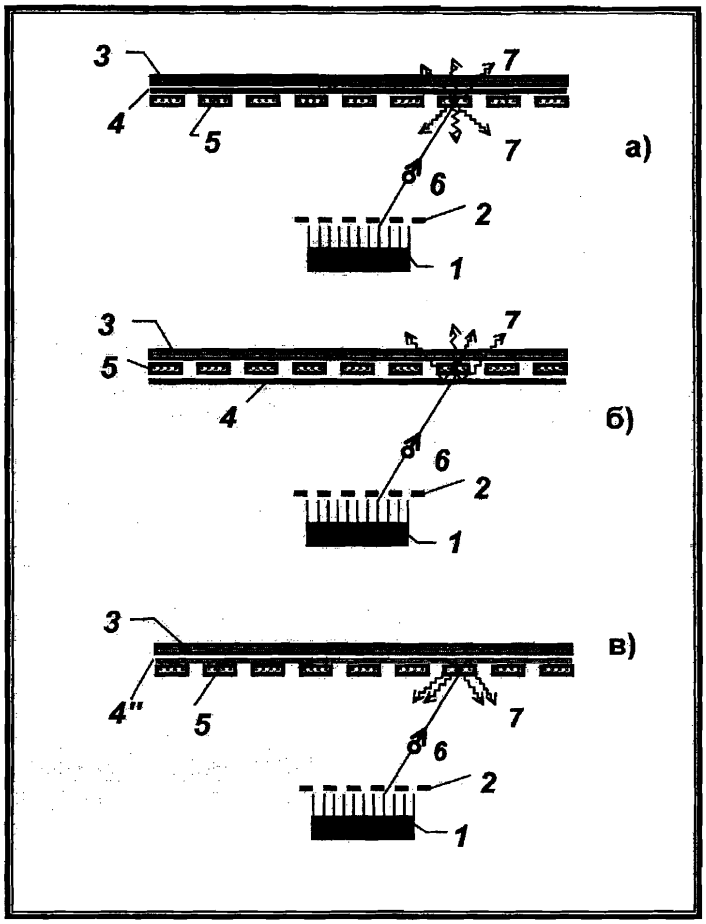

Рис.2. Возможные концептуальные схемы катодолюминесцентных источников света.

1 – катод; 2 – модулятор; 3 – часть стеклянного корпуса источника света; 4 – высокопрозрачное проводящее покрытие; 4' - высокопрозрачное зеркальное покрытие; 4" – непрозрачное зеркальное покрытие; 5 – люминофор; 6 – электроны; 7 – свет.

Свет проходит сквозь: тонкое проводящее покрытие высокой прозрачности, расположенное непосредственно на стекле (а); тонкое, высокопрозрачное зеркальное проводящее покрытие нанесено непосредственно на люминофор, увеличивая световой поток через стекло (б); люминофор нанесен на непрозрачное зеркальное проводящее покрытие, освещаемое пространство – внизу (в).

Рассмотрим сначала кратко свойства и возможности двух существующих типов люминофоров: характеристических и рекомбинационных [32,33].

В характеристических люминофорах электронные переходы, связанные с поглощением и излучением энергии, происходят только внутри иона-активатора, входящего в материал (решетку) основы люминофора. К ним относятся, в основном, люминофоры, применяемые в люминесцентных лампах. Селективное возбуждение (обычно за счет фотонов – класс фотолюминофоров) определяет высокий энергетический (B_E) и квантовый (B_ν) выходы. При этом $B_E = E_Л / E_П$ – отношение энергии люминесценции к поглощенной энергии, тогда как $B_\nu = N_Л / N_П$ – отношение числа квантов, излучаемых люминофором к числу поглощенных квантов. Связь же B_E с B_ν есть: $B_E = (\nu_Л / \nu_П) \cdot B_\nu$, где $\nu_Л$ – частота в максимуме спектра излучения, а $\nu_П$ – частота в максимуме спектра поглощения. Для лучших характеристических люминофоров $B_\nu \approx 0{,}9$.

Как известно [3], в фотолюминесцентных лампах люминофор, нанесенный на внутреннюю поверхность стеклянной трубки, поглощает энергию в области резонансной линии *Hg* – 254 *нм* (у *Hg* есть еще одна линия – 185 *нм*) и излучает в области, соответствующей его спектру люминесценции. Внутри же люминесцентных ламп находится *Ar* с парами *Hg* и горит газовый разряд.

В рекомбинационных люминофорах (к ним относятся основные

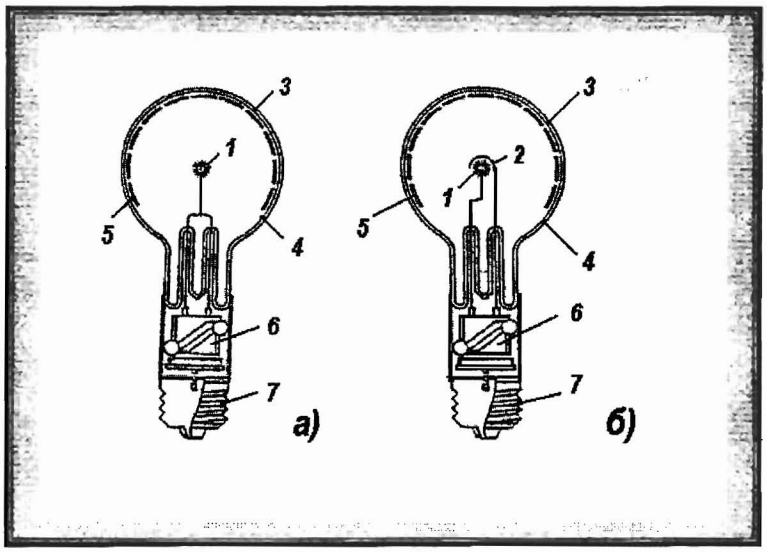

Рис.3. Принципиальные конструкции двухэлектродной (а) и трехэлектродной (б) катодолюминесцентных ламп сферической формы.
1 – катод; 2 – модулятор; 3 – корпус; 4 – высокопрозрачное проводящее покрытие; 5 – люминофор; 6 – преобразователь питания; 7 – стандартный цоколь.

катодолюминофоры) поглощение энергии происходит не только на уровнях активатора, но и в основном веществе. При этом процесс передачи энергии осуществляется переносом электронов и дырок, а излучение происходит в результате рекомбинации свободных электронов с любым центром свечения. В основном такие люминофоры – полупроводники. В них, кроме того, весьма существенны потери энергии электронов на вторичную электронную эмиссию, рассеяние в веществе и т.п.

Особенности катодного возбуждения люминофоров состоят в следующем:

- электроны проникают в люминофоры на небольшую глубину (1 ÷ 5 мкм при энергии 10 ÷ 40 *кэВ*), что приводит к увеличению роли поверхностных слоев люминофора и повышению концентрации энергии в них; это, в свою очередь, влияет на люминесцентные характеристики люминофоров, а также способствует их заметному разогреванию;
- люминофор поглощает энергию электронов неселективно, причем поглощение происходит не в центрах люминесценции, а в материале (кристаллической решетке) люминофора в целом.

Поэтому энергетический выход при катодолюминесценции значительно ниже, чем при фотовозбуждении. Соответственно, теоретическое максимальное значение B_E для сульфидных люминофоров составляет 0,32.

В качестве примера приведем таблицу из [32] (Таблица 1). Она соответствует напряжению $V = 20{,}0$ *кВ* и плотности электронного тока $j = 1{,}0$ *мкА/см*^{2}.

Таблица 1.

Люминофор	B_E	Эффективность, *лм/Вт*
$ZnS \cdot Ag \cdot Al$	0,23	8,0
$ZnS \cdot Zn$	0,18	17,0
$ZnS(50) \cdot CdS(50) \cdot Ag$	0,195	98,0
$ZnS \cdot Cu$	0,23	92,0
$ZnO \cdot Zn$	0,07	26,0
$Zn_3(PO_4) \cdot Mn$	0,08	13,5
$CaWO_4$	0,03	2,0

Как видно из этой Таблицы, величина эффективности не всегда пропорциональна величине B_E; ее теоретическая оценка весьма сложна. Обращают на себя внимание третья и четвертая строчки Таблицы: еще в 1966 году в эксперименте (а это – экспериментальные данные) достигнута величина эффективности порядка 100*лм/Вт*.

Вообще же, как известно из теории [33], световой поток Φ (*лм*) источника света с люминофором, возбуждаемым электронной бомбардировкой, определяется выражением: $\Phi = \pi LS$, где L - яркость свечения, *кд/м*^{2}, S - площадь в *м*^{2}. Яркость свечения L определяется выражением: $L = 10\gamma W$, где γ - световая отдача (в *кд/Вт*), W (*Вт/см*^{2}) – удельная мощность электронной бомбардировки. В свою очередь, световая отдача катодолюминофора на экране (аноде) $\gamma = \chi Q_L$, где χ - энергетический выход $W_{света}/W_{электронов} \approx 8\%$, Q_L - люмен/эквивалент, *лм*/$W_{света}$. С достаточной для практических оценок точностью для зеленого света Q_L =

500*лм/Вт*, для белого света Q_L = 220 *лм/Вт*, для красного света Q_L= 240 *лм/Вт* и для синего света Q_L = 50 *лм/Вт*.

Если корпус источника света имеет сферическую форму радиусом *R*, а рабочей поверхностью (поверхностью, на которую нанесен люминофор) является поверхность полусферы $S = 2\pi R^2$, то общая формула для определения светового потока такого источника будет выглядеть следующим образом: $\Phi = 20\pi R^2 E_э j \chi Q_L$. Здесь удельная мощность $W = E_э j$, где $E_э$ - энергия электронов в *кэВ*, *j* - плотность тока электронов в *мкА/см*^{2}. Используя эту формулу для источника света диодной конфигурации сферической формы с *R* = 2,5 *см*, при напряжении *V* = 5,0 *кВ* и токе *I* = 8 *мА*, для люминофора зеленого свечения получим световой поток Φ = 1570 *лм* и практическую эффективность 40 *лм/Вт*. Отметим, что предельное теоретическое значение эффективности может быть в 5 раз больше – около 200 *лм/Вт* за счет γ = 32% и Q_L = 584 *лм/Вт*. Причинами снижения практической световой отдачи и, соответственно, практической эффективности, являются: неоптимальная толщина люминофора (обычно она выражается в *мг/см*^{2}), потери света на элементах конструкции источника, термическое «тушение» люминесценции при нагреве анода (до 50% при 100^{0}С), запыление люминофора (анода) продуктами испарения и распыления катода и геттера.

Зависимость интенсивности свечения $I_{св}$ (ее измеряют в относительных единицах) от плотности тока электронов *j* точно не известна, хотя она примерно

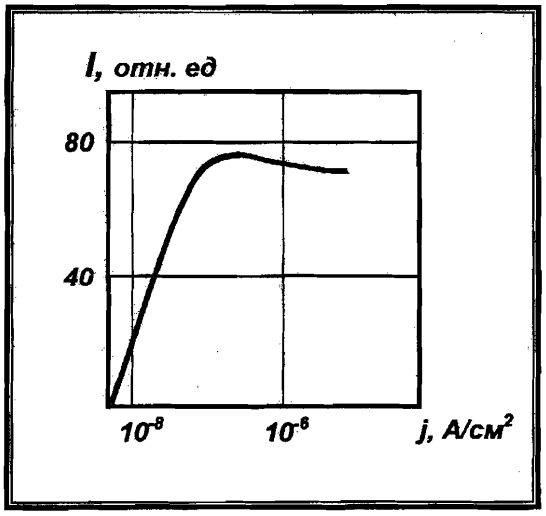

Рис.4. Зависимость интенсивности свечения $I_{св}$ люминофора ZnS · Ag от плотности электронного тока j при V = 15,0 кВ.

линейна вплоть до насыщения. Причем эффект насыщения почти не зависит от энергии электронов. Например, для люминофора $ZnS \cdot Ag$ при V = 15,0 *кВ*, указанная зависимость качественно выглядит, как показано на рис.4. Выгорание люминофора определяется временем эксплуатации, плотностью электронного тока j и напряжением V; с увеличением j и V степень выгорания увеличивается. Отметим, что природа процессов, происходящих в люминофорах при низких и высоких напряжениях, различна; выгорание при низких напряжениях – обратимо, при высоких – нет. Весьма стойкими к выгоранию являются сульфидные люминофоры; за 10 000 часов их работы (при оптимальном подборе рабочих параметров) яркость их свечения снижается не более чем на 30 ÷ 40%. В общем же случае зависимость интенсивности свечения люминофора $I_{св}$ от общего числа попавших на *см*^{2} его площади электронов $N_э$ приближенно может быть выражена: $I_{св} = I_{св,o} / (1 + cN_э)$, где $I_{св,o}$ – начальная интенсивность свечения, а c – параметр выгорания.

Несколько примеров, характеризующих устойчивость люминофоров, приведено в Таблице 2 [32]. Данные соотвествуют энергии возбуждающих люминофоры электронов 10,0 *кэВ*; Q – количество электричества в Кулонах, приводящее к снижению $I_{св}$ в два раза

Таблица 2

Люминофоры	Q, *Кул*	$c \cdot 10^{19}$, *см*^{2}
$ZnS \cdot CdS \cdot Cu$	11,9	0,140
$ZnS \cdot Ag$	10,0 ÷ 20,0	0,170
$Zn_2SiO_4 \cdot Mn$	104,0	0,016
$ZnO \cdot BeO \cdot SiO_2 \cdot Mn$	83,3	0,02
$ZnO \cdot Zn$	33,5	0,05
$CaWO_4$	16,6	0,1

На выгорание люминофоров, помимо прочего, влияет гранулометрический состав; мелкозернистые люминофоры более чувствительны к выгоранию. Влияют на выгорание и условия возбуждения – вакуум, напряжение (энергия электронов).

Зависимость интенсивности свечения люминофора от напряжения V может быть приближенно выражена следующей формулой:
$I_{св} = k \cdot f(j) \cdot (V - V_o)^q$, где k – константа для данного люминофора, V_0 – "мертвое" напряжение (минимальное напряжение, необходимое для прохождения электроном поверхностного слоя люминофора), q = 1 ÷ 3 для разных люминофоров.

Возвращаясь к оценке принципиальных возможностей катодолюминесцентных источников света, использующих автоэлектронную эмиссию, отметим сначала, что в фотолюминесцентных источниках света потери на "поджиг" и поддержание газового разряда составляют порядка 10% от приложенной электрической мощности. Потери на преобразование энергии разряда в энергию света, в лучшем случае, равны также 10% ($B_v \leq 0,9$, см. выше); оптические потери (поглощение в стекле, рассеяние внутри источника и т.п.) – до 10%. В результате коэффициент полезного действия η таких источников света может быть доведен до 70% (это, по-видимому, предельное значение, к которому на практике не приблизились).

В катодолюминесцентных лампах с использованием автоэлектронной эмиссии потери на преобразование приложенной электрической мощности в энергию

электронов составляют 1 ÷ 2 %. Потери на преобразование энергии электронов в энергию света – в лучшем случае 68% ($B_E \leq 0{,}32$). Оптические потери (поглощение в стекле, свечение «не во все стороны» и т.п.) – до 10%. В результате теоретическое максимальное значение η для рассматриваемых источников света составляет приблизительно 20%.

1.4. Сравнение с другими типами источников света. Перспективные области применения. На рис.5 приведена схематическая диаграмма, иллюстрирующая и сравнивающая параметры и принципиальные возможности трех типов источников света: накаливания (Н), фотолюминесцентных (Ф) и обсуждаемых катодолюминесцентных с использованием явления автоэлектронной эмиссии (К). Подчеркивая существенную условность такого сравнения (параметры источников света определены качественно или весьма приближенно, не учтены некоторые источники света новых поколений) оно, тем не менее, позволяет, по нашему мнению – достаточно уверенно, заключить, что рассматриваемые источники света несомненно перспективны для использования в некоторых областях не только специального, но и, возможно, – бытового освещения. К наиболее привлекательным параметрам рассматриваемых источников света следует, по-видимому, отнести: их высокую экологичность, широкий диапазон рабочих температур (автоэлектронную эмиссию называют еще «холодной», поскольку это чисто квантово-механический эффект, не зависящий от температуры – см. ниже); высокую устойчивость к механическим вибрациям и колебаниям напряжения в сети; широчайший диапазон цветности; высокую долговечность. Ясно, что некоторые из параметров достигаются исключительно за счет используемого автоэмиссионного источника электронов и, более того, в большей степени к нему и относятся (рабочие температуры, время включения, устойчивость к механической тряске и к колебаниям напряжения в сети, долговечность), другие достигаются исключительно за счет использования катодолюминофоров (эффективность, широкий спектр цветов). Наконец, некоторые из весьма важных параметров, являясь чрезвычайно высокими для автоэмиссионных катодов, в весьма существенной степени ограничены люминофорами; это и рабочие температуры, и долговечность, и время включения.

На рис.6 приведена сравнительная (так же - весьма условная) диаграмма привлекательности использования в различных областях источников света тех же трех типов. Без сомнения, перспективными областями является реклама, освещение на транспорте (здесь определяющие привлекательность параметры – устойчивость к вибрациям, экологичность), светофоры (по своим эксплуатационным параметрам они, по нашему мнению, не будут сильно отличаться от получающих сейчас все большее распространение светофоров на основе светодиодов [34], однако их стоимость будет заведомо более низкой), авиация и космос (т.е., прежде всего, работа при низких температурах), аварийное освещение (безопасность, работа от аккумуляторов, экологичность). Нельзя не отметить и открываемые здесь широкие возможности миниатюризации источников света различного назначения, вплоть до создания цветных матричных дисплейных экранов на основе миниатюрных элементов.

Параметры источников света		Шкала параметров ⊖ ⟷ ⊕		
A	Максимальный КПД, %	Н	К	Ф
		5,0	≈ 20,0	≈ 70,0
B	Эффективность, лм/вт	Н	К	Ф
		до 20	до 50	80 и более
C	Рабочие температуры	Н	Ф	К
		высокие	средние	любые
D	Время жизни, часы	Н		К/Ф
		до 1000	5000	10000 и более
E	Время включения, сек	Ф	Н	К
		1÷5	10^{-1}	10^{-8}
F	Устойчивость к вибрациям	Н	Ф	К
		низкая	средняя	высокая
G	Устойчивость к колебаниям напряжения в сети	Н	Ф	К
		низкая	средняя	высокая
H	Цветность	Н	Ф	К
		один цвет	ограниченная	любая
I	Экологичность	Ф	Н	К
		низкая	средняя	высокая
J	Стоимость	К/Ф		Н
		высокая	средняя	низкая

Рис.5. Сравнительная диаграмма параметров и возможностей источников света трех типов: накаливания (Н), фотолюминесцентных (Ф) и катодолюминесцентных с использованием явления автоэлектронной эмиссии (К).

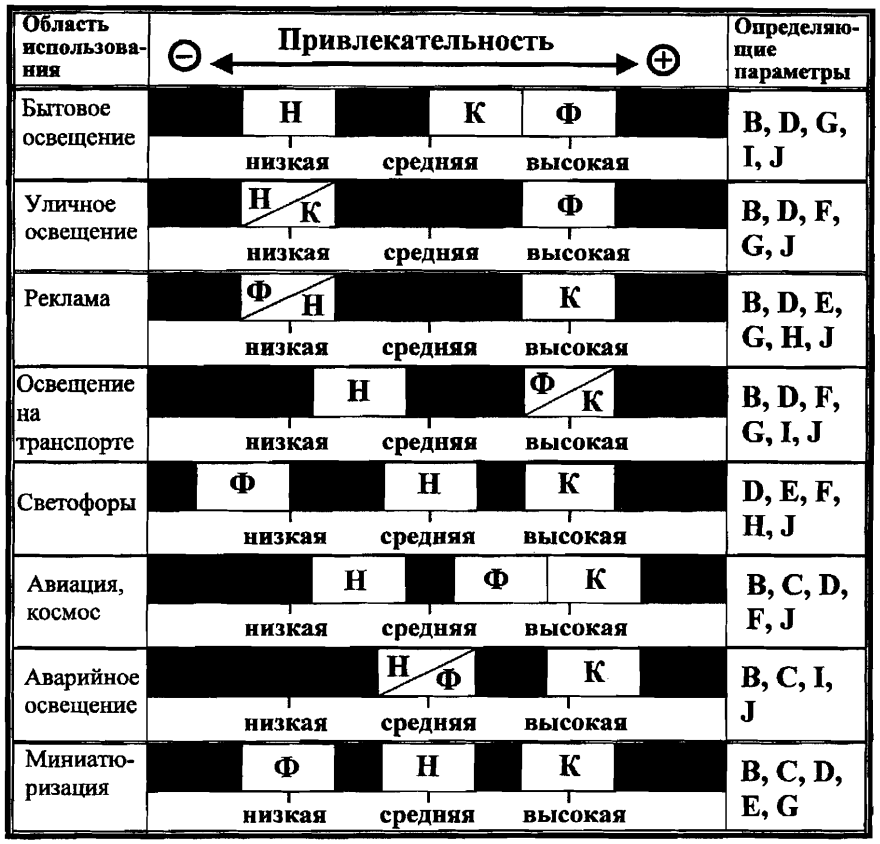

Рис.6. Сравнительная диаграмма привлекательности использования в различных областях источников света трех типов: накаливания (Н), фотолюминесцентных (Ф) и катодолюминесцентных с использованием явления автоэлектронной эмиссии (К).

2. КАТОДЫ НА ОСНОВЕ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ.

2.1. Явление автоэлектронной эмиссии. В электрических полях напряженностью порядка $10^8 \div 10^{10}$ *В/м* могут реализоваться четыре квантово-механических эффекта, имеющих то или иное отношение к рассматриваемой здесь теме. Это автоионизация (ионизация атомов или молекул газа в свободном пространстве или вблизи поверхности электропроводящего материала путем туннельного прохождения валентного электрона через измененный электрическим полем запирающий электрон потенциальный барьер) [35], испарение и десорбция полем (удаление поверхностных атомов электропроводящих материалов или атомов и молекул, присутствующих на поверхности инородных веществ соответственно практически при любых температурах, путем туннелирования в виде атома или иона) [36], и, наконец, автоэлектронная эмиссия – туннельный выход свободных электронов из электропроводящих материалов сквозь измененный и пониженный сильным электрическим полем потенциальный барьер на границе раздела твердое тело – вакуум (рис.7) [1,2]. Поля указанной напряженности достаточно просто получить, используя в качестве одного из электродов в диодном промежутке иглу (острие) или лезвие чрезвычайно высокой кривизны; эмпирическая зависимость напряженности электрического поля F от кривизны поверхности R_0 выглядит следующим образом: $F = V / \beta R_0$, где V - приложенное напряжение, а β - геометрический фактор, приближенно равный 5. Отсюда легко видно, что для получения поля напряженностью $F \approx 10^9$ *В/м* вблизи поверхности острия со средним радиусом $R_0 \approx 100$ *нм*, необходимо приложить напряжение V всего 0,5 *кВ*. Здесь, правда, необходимо особо подчеркнуть, что

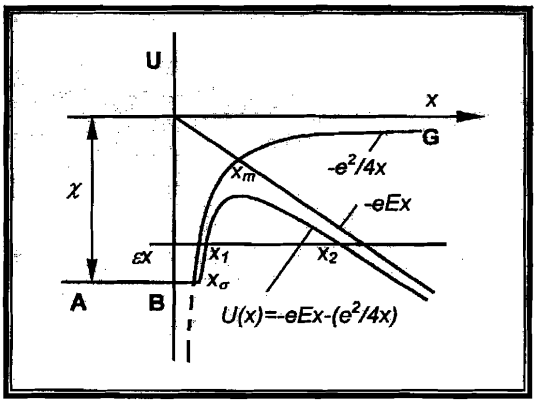

Рис.7. Ход потенциала у поверхности металла в зависимости от расстояния: $-e^2/4x$ – «потенциал» сил изображения; $-eEx$ – внешний потенциал; $U(x)$ – суммарный потенциал; εx – уровень Ферми в металле; χ - полная глубина потенциальной ямы в металле.

приведенные оценки соответствуют диодной системе с острийным (катод) и плоским (анод) электродами на расстоянии $l_{a\text{-}к}$, существенно превышающем кривизну острия. Если величина $l_{a\text{-}к}$ становится сравнимой или меньшей R_0 ($l_э \leq R_0$), то необходимое для создания указанных высоких полей напряжение в межэлектродном промежутке резко падает и может составить всего десятки и даже единицы *Вольт*.

Основы теории автоэлектронной эмиссии были заложены Фаулером и Нордгеймом [1]. Границы ее применимости, а также некоторые основные положения последующих, уточняющих, теорий достаточно детально рассмотрены в [2]. Здесь мы не будем касаться этих вопросов – главным образом ввиду удовлетворительного соответствия оценок по теории Фаулера-Нордгейма экспериментальным данным.

Решая одномерную задачу и вычисляя прозрачность потенциального барьера на границе металл-вакуум с помощью метода Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна [37], можно получить уравнение для плотности тока автоэлектронной эмиссии $j_{АЭЭ}$ как функции напряженности электрического поля F и работы выхода электронов φ:

$$j_{АЭЭ} = 1{,}54\cdot 10^{-6}\frac{F^2}{t^2(y)\varphi}\exp\left\{-6{,}83\cdot 10^7\frac{\varphi^{3/2}}{F}v(y)\right\};$$

здесь $j_{АЭЭ}$ - в *А/см*^{2}, φ - в *эВ*, F - в *В/см*,

$y = 3{,}79\ 10^{-7}\sqrt{F}/\varphi$ и $t(y) = \upsilon(y) - (2y/3)\,(d\upsilon(y)/dy)$.

Функции $t(y)$ и $\upsilon(y)$ задаются, как правило, в виде таблиц (табулированы). Причем следует отметить, что $t(y)$ слабо зависит от y (т.е. от F и φ) и близка к единице, чего нельзя сказать о $\upsilon(y)$. Зависимость υ (ее принято называть функцией Нордгейма) от y дана в виде таблицы, например, в [2]. Определяя на практике зависимость тока автоэлектронной эмиссии $I_{АЭЭ}$ острийного или лезвийного эмиттера ($I_{АЭЭ} = j_{АЭЭ}\cdot S_0$, где S_0 - площадь рабочей поверхности эмиттера) от его потенциала V_0 и строя графические зависимости $lg\,(I_{АЭЭ}/V_0^2) = f(1/V_0)$, получают прямые линии – так называемые прямые Фаулера-Нордгейма. Их наклон позволяет достаточно просто рассчитать величину работы выхода φ материала эмитирующей поверхности. Поправка к наклону этих прямых $S^*(y)$ описывается функцией

$$S^*(y) = \upsilon(y) - (y/2)\,(d\upsilon(y)/dy),$$

которая, так же как и $t(y)$, близка к единице. Вся теория Фаулера-Нордгейма построена в предположении, что температура T_0 эмиттера равна нулю.

2.2. Процессы, сопровождающие автоэлектронную эмиссию. Обратимся теперь кратко к "сопутствующим" процессам, имеющим место в сильных электрических полях. Прежде всего, это – большое механическое нагружение острий или микровыступов пондеромоторными силами электрического поля [38]. Величина этого напряжения может быть приближенно оценена из соотношения: $\sigma = F^2/8\pi$ или $\sigma = 44{,}3\ F^2$ *кг/мм*^{2}, если напряженность поля F измерена в *В/Ангстрем*. В электрических полях, необходимых для реализации заметной автоэлектронной

эмиссии, механические напряжения σ не превышают предела прочности на отрыв $\sigma_в$ массивных материалов; в полях же, соответствующих условиям испарения или десорбции полем (эти процессы в ряде случаев весьма целесообразно использовать для подготовки или восстановления рабочей поверхности автоэмиссионного катода), величина σ существенно превышает $\sigma_в$ и по порядку величины достигает значений теоретической прочности материалов σ_m. В результате материал острия или другого микровыступа (эмитирующего центра) может деформироваться или, в предельном случае - разрушиться. К счастью, на практике это происходит крайне редко, что связано с чрезвычайно малыми размерами эмитирующих центров. Вообще же говоря, прочность σ кристаллов малых размеров (так называемых нитевидных) связана с их диаметром d приближенным соотношением [39]: $\sigma = \alpha + \beta/d$, где α и β - константы, причем полагается существование минимального значения d_{min}, соответствующего $\sigma = \sigma_m$; при $d \leq d_{min}$ $\sigma = \sigma_m = const$. Значение σ_m составляет приблизительно 1/10 часть модуля Юнга [40].

Следующим эффектом, сопутствующим автоэлектронной эмиссии и весьма существенным образом влияющим на ее параметры, является непрерывная бомбардировка рабочей поверхности катодов ионами остаточных газов. Образование этих ионов происходит по механизму электронного удара в пространстве катод – анод. Особенно ощутимое влияние на автоэлектронную эмиссию указанная бомбардировка оказывает в тех случаях, когда катод работает в условиях технического вакуума (на уровне 10^{-6} *Торр*), а напряжение в диодном промежутке составляет несколько *кВ*.

Согласно [41], число ударов ξ_u, испытываемых всей рабочей поверхностью острия в единицу времени, может быть оценено по формуле:

$$\xi_u = \sum_i \xi_{u,i} = \sum_i \left[1{,}44 \frac{P_i I_{АЭЭ}}{kT_0 e} \overline{R_0} \sigma(\Psi) \right],$$

где P_i - парциальное давление компонентов остаточных газов, k - постоянная Больцмана, T_0 - температура острия, e - заряд электрона, $\overline{R_0}$ - средний радиус кривизны поверхности острия и $\sigma_i(\Psi)$ - сечение ионизации, равное

$$\sigma_i(\Psi) = \frac{N_e \pi a_0}{V_u^2} 2{,}66 \frac{\Psi - 1}{\Psi^2} \ln(1{,}25\Psi).$$

В последней формуле N_e - число электронов во внешней оболочке ионизирующегося атома остаточного газа, a_0 - радиус первой боровской орбиты, V_u - потенциал ионизации атома, а $\Psi = E_e / V_u$, где E_e - энергия электрона, равная значению потенциала в точке ионизации данного атома.

По мнению авторов [42], средняя энергия образованных таким образом ионов остаточных газов составляет $V/2$; в [43] высказано предположение, что распределение этих ионов по энергиям близко к распределению Максвелла-Больцмана. Единственная экспериментальная информация на этот счет была получена в [44].

Указанная бомбардировка поверхности автоэмиттеров низкоэнергетичными ионами остаточных газов может иметь как отрицательное, так и положительное значение. В практике эксплуатации приборов на основе автоэлектронной эмиссии она может обусловливать изменение структуры поверхности, образование на ней различного рода дефектов [45], распыление материала поверхности [46,47], перераспределение активирующего электронную эмиссию компонента (пленки), наконец, вакуумный пробой и полный выход эмиттера из строя.

Важное влияние на характер автоэлектронной эмиссии (ее параметры) могут, при определенных условиях, оказывать процессы адсорбции, десорбции и поверхностной миграции частиц остаточных газов [48]. При этом все они, в той или иной степени, инициируются ионной бомбардировкой поверхности. Ионная бомбардировка может вызывать и направленную диффузию растворенных в материале эмиттера компонент к поверхности, изменять состав поверхностных атомных слоев, инициировать поверхностную миграцию не только адсорбированных газовых атомов, но и атомов самого материала эмиттера.

2.3. Исходная структура и эмиссионные свойства поверхности. Как уже говорилось выше, для создания автоэлектронной эмиссии при напряжении в несколько *кВ* необходимо наличие фрагментов электропроводящего материала с высокой кривизной поверхности – на уровне 100 ÷ 1000 *нм*; их называют эмитирующими центрами или, что то же – центрами автоэлектронной эмиссии. В принципе, автоэмиссионный катод может содержать любое количество таких центров; их собственная геометрия и взаимное расположение в значительной степени определяют эксплуатационные параметры катода.

Однако, для правильного конструирования катода и оптимизации его рабочих режимов и параметров необходимо сначала детально проанализировать и понять работу катода с одним эмитирующим центром, т.е. работу некоторого идеализированного острия – конуса с полусферической вершиной. Как известно, весьма близко к такой геометрии приближаются типичные образцы для исследования в автоионном микроскопе [35,49]. Не вдаваясь в детали достаточно широко распространенной методики автоионной микроскопии, проиллюстрируем с помощью типичного автоионного изображения поверхности вольфрамового острия (см. рис.8) атомную структуру единичного эмитирующего центра. Каждая яркая точка на изображении соответствует единичному атому поверхности. Изображение фактически представляет собой радиальную проекцию почти полусферической поверхности острия на плоский экран с люминофором. При этом отображаются только те атомы поверхности, которые в наибольшей степени на ней выступают. Как видно, поверхность состоит из большого набора плоских, круглых граней с многочисленными соединительными «ребрами» между ними. Кривизна поверхности в области этих «ребер» существенно выше, чем на гранях, причем даже на гранях она меняется, снижаясь к их центру. В результате, когда такое острие располагают напротив проводящего плоского анода и между ними создают разность потенциалов в несколько *кВ* (на острие – «минус»), поверхность начинает эмитировать автоэлектроны весьма неравномерно: больше в областях с большей кривизной поверхности и совсем их ничтожное количество в области центров граней. В этом можно весьма наглядно убедиться, если покрыть плоский анод люминофором (такой прибор называют автоэлектронным микроскопом [1,45], см. рис.9а). Темные области на приведенном автоэлектронном изображении как раз и соответствуют центрам плоских граней, тогда как яркие области – упоминавшимся

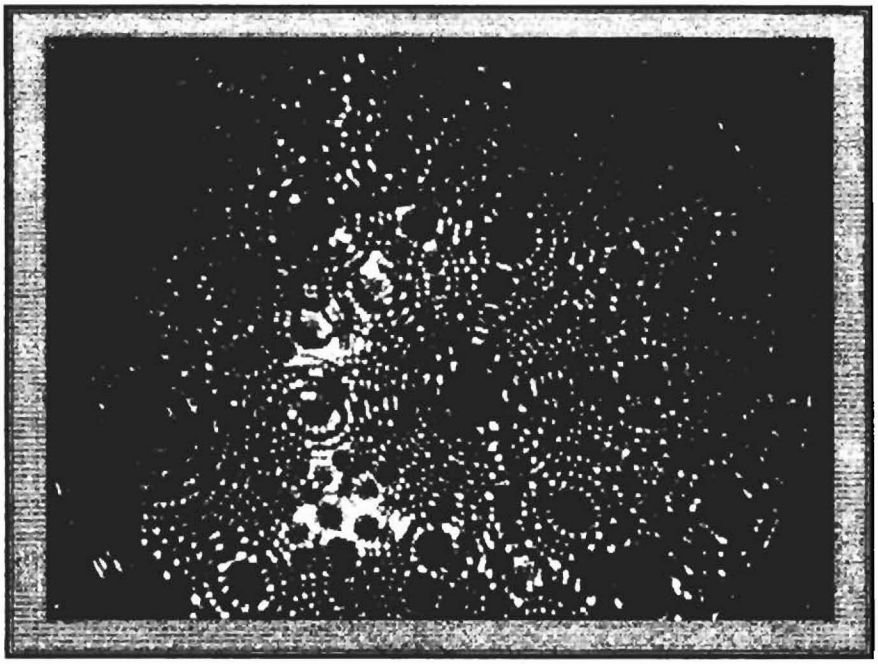

Рис.8. Типичное автоионномикроскопическое изображение поверхности вершины полусферического острия из вольфрама – идеализированного единичного центра автоэлектронной эмиссии. Увеличение более чем 10^6x, разрешение – атомарное.

«ребрам» между ними. Повышая разность потенциалов между катодом (острием) и анодом (плоским экраном с люминофором) мы повышаем, тем самым, и напряженность электрического поля над всеми участками поверхности; на автоэлектронном изображении результат такой операции проявиться как увеличение яркой площади и уменьшение диаметра черных кружков. Принципиально можно представить себе такую ситуацию, что электрическое поле даже в области центров плоских граней достигло необходимой напряженности и поверхность вершины острия эмитирует в каждой точке. Однако, на практике, достичь такой ситуации бывает крайне трудно. Это связано с тем, что ток автоэлектронной эмиссии экспоненциально зависит от напряженности поля, и еще до того, как поле достигнет над плоскими участками поверхности достаточной для автоэлектронной эмиссии напряженности, ток с «ребер» станет настолько высоким, что острие будет расплавлено джоулевым теплом.

Ситуацию удается несколько улучшить за счет сильного кратковременного прогрева острия в отсутствие электрического поля. Такой кратковременный прогрев

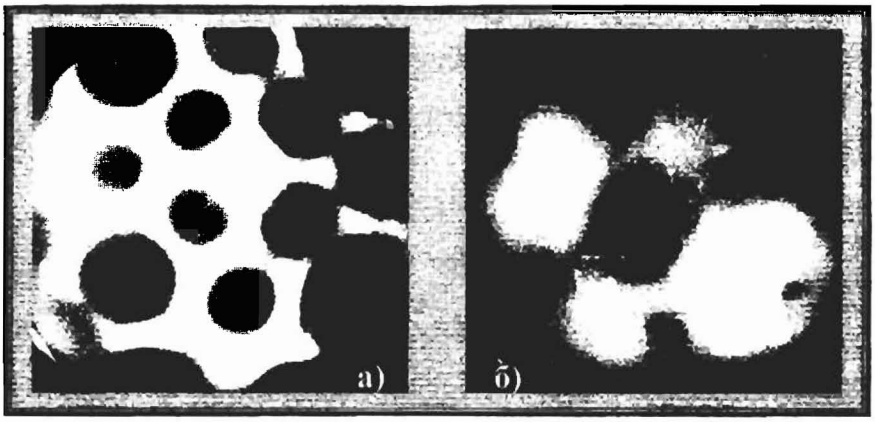

Рис.9. Автоэлектронномикроскопические изображения поверхности вольфрамовых острий, качественно отражающие распределение величины автоэлектронного тока, эмитируемого различными участками. Изображение (а) соответствует развитой, «ребристой» поверхности, изображение (б) – поверхности, термически сглаженной без поля.

существенно сглаживает поверхность, снижая ее «ребристость» (см. изображение рис.9б). Прогрев материала острия в присутствии поля дает обратный эффект: в результате термически активированной диффузии поляризованные поверхностные атомы мигрируют в область более сильного поля, т.е. к «ребрам», достраивая их и «обнажая» (увеличивая) плоские участки. В принципе, этим процессом можно управлять, формируя поверхности сложной конфигурации с микровыступами высокой локальной кривизны [50].

Рассматривая равномерность генерирования автоэлектронного тока поверхностью острия (эмиссионного центра катода), а также эмиссионные свойства катодов в целом, нельзя обойти вниманием такой важнейший параметр электропроводящих материалов, как уже упоминавшуюся, фигурирующую в приведенном выше уравнении для автоэлектронной эмиссии, работу выхода электронов φ [51,52]. Как известно, она определяется минимальной энергией, необходимой для перемещения электрона с поверхности Ферми в твердом теле при температуре, равной абсолютному нулю, в точку пространства, где поле практически равно нулю. Величина работы выхода различна не только для разных материалов, но и имеет весьма широкие вариации для одного и того же материала в зависимости от плотности упаковки кристаллографических граней. Таким образом, даже термически сглаженная поверхность острия-эмиттера характеризуется заметными вариациями автоэлектронного тока, связанными, помимо прочего, с различной упаковкой разных граней. Кроме того, работа выхода существенно зависит от состава поверхностного слоя, его чистоты. Наличие адсорбированных частиц на поверхности эмиттера также обусловливает вариации величины работы выхода.

Важной практической задачей при создании катодов любых типов является снижение работы выхода эмитирующих материалов. Оно дает возможность существенно повысить общий ток электронов при неизменном напряжении, либо достичь необходимой мощности при меньшем рабочем напряжении. В принципе, понизить работу выхода можно простой заменой одного материала катода на другой. Однако, в большинстве практических случаев на выбор материала катода влияет не столько величина его работы выхода, сколько механические свойства и технологичность. Прекрасными эмиссионными свойствами, например, обладают такие материалы, как *Li* ($\bar{\varphi}$ = 2,39 *эВ*), *K* ($\bar{\varphi}$ = 2,35 *эВ*), *Ca* ($\bar{\varphi}$ = 2,8 *эВ*), *Rb* ($\bar{\varphi}$ = 2,16*эВ*), *Sr* ($\bar{\varphi}$ = 2,35 *эВ*), *Cs* ($\bar{\varphi}$ = 1,81 *эВ*) и ряд других. В тоже время эти материалы настолько нетехнологичны, что изготовление из них автоэмиссионных катодов просто невозможно. С другой стороны, тугоплавкие вольфрам ($\bar{\varphi}$ = 4,54 *эВ*) или углерод ($\bar{\varphi}$ = 4,7 *эВ*) – материалы, во всех других отношениях весьма подходящие для изготовления катодов. Учитывая заметную зависимость величины работы выхода одного и того же материала от плотности упаковки кристаллографических граней (для *W*, например, $\varphi(100)$ = 4,9 *эВ*, $\varphi(110)$ = 5,7 *эВ*, $\varphi(111)$ = 4,6 *эВ*, $\varphi(013)$ = 4,3 *эВ*, тогда как приводимое часто значение φ = 4,54 *эВ* является усредненным для большинства граней, а точнее – значением для поликристаллического материала [52]), для того же вольфрама «снизить» работу выхода можно за счет использования острий из монокристаллов, ориентированных по оси, соответствующей минимальному значению $\varphi(hkl)$.

Достаточно очевидным и распространенным способом снижения работы выхода является нанесение на поверхность катодов из тугоплавких материалов тонких пленок материалов с низкой работой выхода (например, *Cs* на поверхность *W*). Однако, такие пленки устойчивы только в условиях ультравысокого вакуума (не хуже 10^{-10} *Торр*). В условиях технического вакуума интенсивная бомбардировка поверхности ионами остаточных газов достаточно быстро приведет к деградации и, затем, полному распылению пленки [44]. Лучший способ – использование сплавов на основе прочного тугоплавкого материала с добавками легкоплавкого компонента с низкой работой выхода. Однако, создать такие сплавы обычным способом удается в крайне редких случаях. Связано это с тем, что большинство подходящих с этих позиций компонент не растворяются в тугоплавкой матрице ни в жидком, ни в твердом состоянии. Соответственно, в получаемом обычным образом сплаве легкоплавкая компонента присутствует в виде локализованных микровключений. Авторы [53,54] предложили использовать такие материалы в качестве автоэмиссионных катодов в режиме периодического подогрева, стимулирующего термическую диффузию легкоплавкого компонента из объема к поверхности и создание (воссоздание по мере надобности за счет обратной связи эмитируемый ток – температура катода) на его поверхности пленки вещества с низкой φ. Другой способ создания рассматриваемых сплавов – имплантация легкоплавкого компонента в тугоплавкую матрицу в виде ускоренных ионов [55].

Важным эксплуатационным параметром автоэмиссионных катодов является стабильность эмитируемого ими тока. Помимо естественной для любого вида эмиссии частиц «дробовой» компоненты шума [56], автоэлектронный ток имеет еще и относительно низкочастотную компоненту шума, изменение спектральной плотности мощности которой $W(f)$ близко к зависимости $1/f^{\zeta}$, где ζ заключена в пределах 0,8 ÷ 1,2. Это так называемый фликкер-шум автоэлектронной эмиссии.

Начиная с открытия в 1925 году, он был затем обнаружен в полупроводниковых приборах, источниках света, биологических системах (мембранах нервных клеток) и других объектах (см., например, [57]).

Как известно, при изучении флуктуаций тока основными анализируемыми величинами являются функция корреляции (автокорреляция) $f^*(\tau)$ и функция спектральной плотности мощности шума $W(f)$:

$$f^*(\tau) = \langle I(t)\, I(t+\tau)\rangle, \quad W(f) = \langle dI^2\rangle / df.$$

Указанные величины объединяет формула Винера-Кинчина:

$$W(f) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} f^*(\tau)\exp(-2\pi i f\tau)d\tau .$$

Кроме того, соотношение между средним квадратом флуктуации силы тока $(\overline{\Delta I})^2$, флуктуацией корреляции и флуктуацией спектральной плотности мощности шума дается выражением:

$$\langle \Delta I^2\rangle = f^*(0) = \int_0^{\infty} W(f)df .$$

В соответствии с принятыми в настоящее время представлениями, наиболее существенной причиной фликкер-шума автоэлектронной эмиссии является наличие на поверхности автоэмиттера адсорбированных частиц и их нерегулярное движение по поверхности [57].

Поскольку стохастические процессы, в которых участвуют адсорбированные частицы, определяются системой подложка – адсорбат, степенью покрытия θ и температурой T_0, были развиты специальные модели, описывающие упрощенные случаи поверхностной диффузии и смещений адсорбированных частиц. Так, в частности, в некоторых работах высказаны предположения (и выведены оценочные уравнения), что причиной шума автоэлектронной эмиссии является создание и разрушение небольших атомных кластеров. И хотя диффузия таких кластеров была качественно подтверждена наблюдениями в автоионном микроскопе [35], такая модель требует дальнейшего развития. Автор [58] высказал предположение, что причина фликкер-шума – в флуктуации концентрации покрытия (адсорбированных частиц) в локализованных участках поверхности эмиттеров (так называемая модель «заплат»). Важное следствие этой работы – пропорциональность $W(f) \sim f^{-3/2}$. Однако, ни эта модель, ни ранняя адсорбционно-десорбционная модель, не оказались приложимыми (не смогли объяснить экспериментальные результаты) для анализа фликкер-шума автоэлектронной эмиссии металлопленочной системы металл - металл (а не металл – газ). В [58] детально рассмотрены флуктуации плотности адсорбата в локализованных небольших областях поверхности, а в [59] изучена их (флуктуаций) температурная зависимость и влияние взаимодействия адсорбированных частиц с подложкой и между собой. Однако, к сожалению, в этих работах не была определена функция спектральной плотности мощности фликкер-шума $W(f)$, что не позволяет проанализировать общность полученных результатов и их приложимость к различным реальным системам.

Наиболее совершенной на сегодняшний день является, по-видимому, модель поверхностной диффузии адсорбата, развитая в [57]. В ее основе лежит предположение, что адсорбированные частицы на поверхности автоэмиттера (острия) могут находиться в двух положениях (*1 и 2*) с энергиями связи – Q_1 и – Q_2, причем $(\Delta Q - Q_m) < - Q_1$, где Q_m - энергия миграции частиц. Поверхностная плотность этих мест – соответственно N_1' и N_2', число занятых мест – n_1 и n_2', т.е. степень покрытия $\theta = (n_1' + n_2') / (N_1' + N_2')$. Кроме того, вводится некая эффективная работа выхода $\varphi_{эф}$, зависящая от положения адсорбированной частицы. Рассматривая переходы адсорбированных частиц $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 1$ и соответствующие изменения величин $\varphi_{эф}$, автор [57] вывел уравнение для $W(f)$ и среднего значения квадрата амплитуды флуктуаций $(\overline{\Delta I})^2$ для случая поверхностной диффузии адсорбированных частиц в условиях десорбционно-адсорбционного равновесия.

Экспериментальное исследование фликкер-шума автоэлектронной эмиссии чистых металлов, полупроводников и пленочных систем металл – газ, металл – металл, полупроводник – газ было предметом значительного числа работ (см., например, уже обсуждавшиеся [57,59]). Здесь же еще раз подчеркнем, что имеющая место при работе автоэмиссионного катода в условиях технического вакуума при напряжении V в несколько *кВ* интенсивная ионная бомбардировка поверхности также весьма существенным образом влияет на стабильность автоэлектронного тока. Это влияние опосредованно обусловлено и усилением адсорбционно-десорбционных процессов, и активацией поверхностной миграции собственных поверхностных атомов материала катода, и изменением поверхностного рельефа за счет распыления. Причем, в последнем случае степень обсуждаемого влияния определяется характером распыления – по-атомным или кластерным [46,60-62]. Ясно, что при реализации кластерного распыления изменения поверхностного рельефа наиболее существенны; соответственно и амплитуды колебания автоэлектронного тока могут достичь больших величин, Ясно также, что увеличение числа работающих одновременно автоэмиссионных катодов усредняет (сглаживает) флуктуации, обусловленные, в частности, кластерным распылением.

Таким образом, можно заключить, что рабочие (эксплуатационные) параметры автоэмиссионных катодов определяются рассмотренными выше явлениями и процессами в комплексе. Соответственно, в комплексе они должны рассматриваться при анализе и оптимизации работы автоэмиссионных катодов, при оценке времени жизни катодов (долговечности) и их надежности. Отметим, что вообще говоря, время жизни автоэмиссионных катодов принципиально ничем не ограничено.

В заключение этого раздела рассмотрим кратко еще один весьма важный вопрос, связанный с режимами реальной эксплуатации автоэмиссионных катодов. Это – вопрос о специальной предварительной тренировке свежеприготовленного катода (в некоторых отечественных работах ее называют «формовкой» [63]). Предварительно отметим, что в общем случае в работе автоэмиссионного катода можно выделить три стадии, каждая из которых характеризуется связанным именно с ней и ее целями обусловленным режимом. Это - уже упомянутая стадия предварительной тренировки, стадия эксплуатации и стадия восстановительной обработки. Причем, если первая стадия осуществляется лишь один раз, при первом включении приготовленного катода, то вторая и третья стадии могут

повторяться многократно, чередуясь в задаваемом порядке в зависимости от изменения эксплуатационных параметров катода.

Предварительная тренировка свежеприготовленного автоэмиссионного катода подразумевает постепенный, ступенчатый подъем высокого напряжения на катоде с выдержками на каждом шаге подъема в течение времени, заведомо достаточного для установления постоянного значения тока. При этом может быть выбран постоянным либо шаг подъема напряжения ΔV, либо – что, по-видимому, более оправдано, шаг $\Delta I_{АЭЭ}$ возрастания автоэмиссионного тока. Качественные зависимости изменения тока и напряжения для обоих вариантов тренировки показаны на графиках рис.10 и рис.11. Целью предварительной тренировки является формирование исходной рабочей поверхности, динамически устойчивой в процессе дальнейшей эксплуатации. Причем указанное формирование поверхности осуществляется как за счет ионной бомбардировки, так и за счет постепенного частичного сглаживая наиболее острых выступов на поверхности катода джоулевым теплом. Практика многочисленных предшествующих работ различных авторов показала необходимость и важность этой первой стадии. Однако, все известные нам публикации демонстрируют существенно эмпирический подход к выбору режимов тренировки. Другими словами, до сих пор не выработано количественных критериев выбора режимов тренировки. Качественно же они выражаются весьма просто и вполне логично: чем медленнее катод включается в работу, тем лучше.

Рассмотрим сначала режим тренировки, качественно иллюстрируемый рис. 10. Тренировка начинается с постепенного подъема напряжения на катоде (скорость подъема напряжения $(dV/dt) = (dV/dt)^*$ - первый параметр, который должен быть определен количественно при тренировке каждого конкретного типа катодов) до величины V_0, соответствующей появлению небольшого, но четко регистрируемого тока автоэлектронной эмиссии $(I_{АЭЭ})_0$. Величина этого тока – второй параметр, который должен быть определен количественно также для каждого конкретного типа катода (далее мы это повторять не будем). Как правило, автоэмиссионный ток вначале быстро спадает, после чего становится относительно стабильным. Во многих случаях, однако, спад тока продолжается весьма долго. Поэтому, окончание первого шага тренировки (время t_1, как, впрочем, и всех последующих шагов) также должно быть определено количественно, например, достижением некоторой конкретной скорости спада тока $(dI_{АЭЭ}/dt) \leq (dI_{АЭЭ}/dt)^*$. После этого напряжение на катоде (в промежутке катод – анод) поднимается на величину $\Delta V = (\Delta V)^* = const$ и т.д., вплоть до величины V_5 (в общем случае V_i, поскольку рассматриваемый рис.10 является упрощенной схематической иллюстрацией). При этом напряжение поднимается с выбранным шагом $(\Delta V)^*$ до тех пор, пока максимально не приблизиться к величине $V_{раб}\ (1 + \rho)$. Выбор рабочего напряжения $V_{раб}$ определяется заданными эксплуатационными параметрами катода и использующего его источника света (или какого-либо другого прибора).

После достижения максимального напряжения начинается снижение V с тем же шагом; последний шаг соответствует установлению $V = V_{раб}$ и выдержке катода в течение времени $(\Delta t)_к$

Таким образом, как минимум шесть количественных параметров предварительной тренировки ($(dV/dt)^*$, $(I_{АЭЭ})_0$, $(dI_{АЭЭ}/dt)^*$, $(\Delta V)^*$, ρ и $(\Delta t_к)$) должны быть обоснованно выбраны во взаимосвязи с составом, структурой и свойствами материала катода, составом и парциальными давлениями остаточных (либо

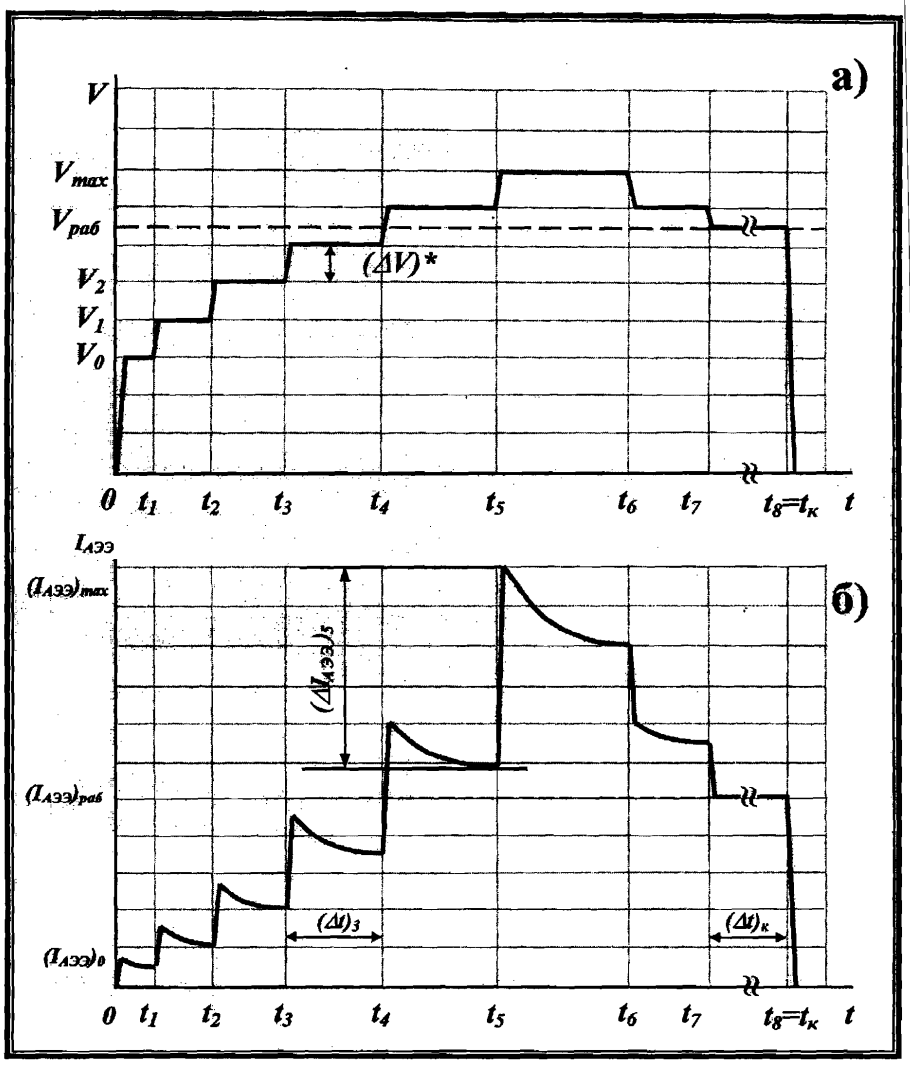

Рис.10. Схематические диаграммы изменения напряжения (а) и автоэмиссионного тока (б) в процессе предварительной тренировки катодов. Режим тренировки соответствует условию $(\Delta V)_i$ = const.

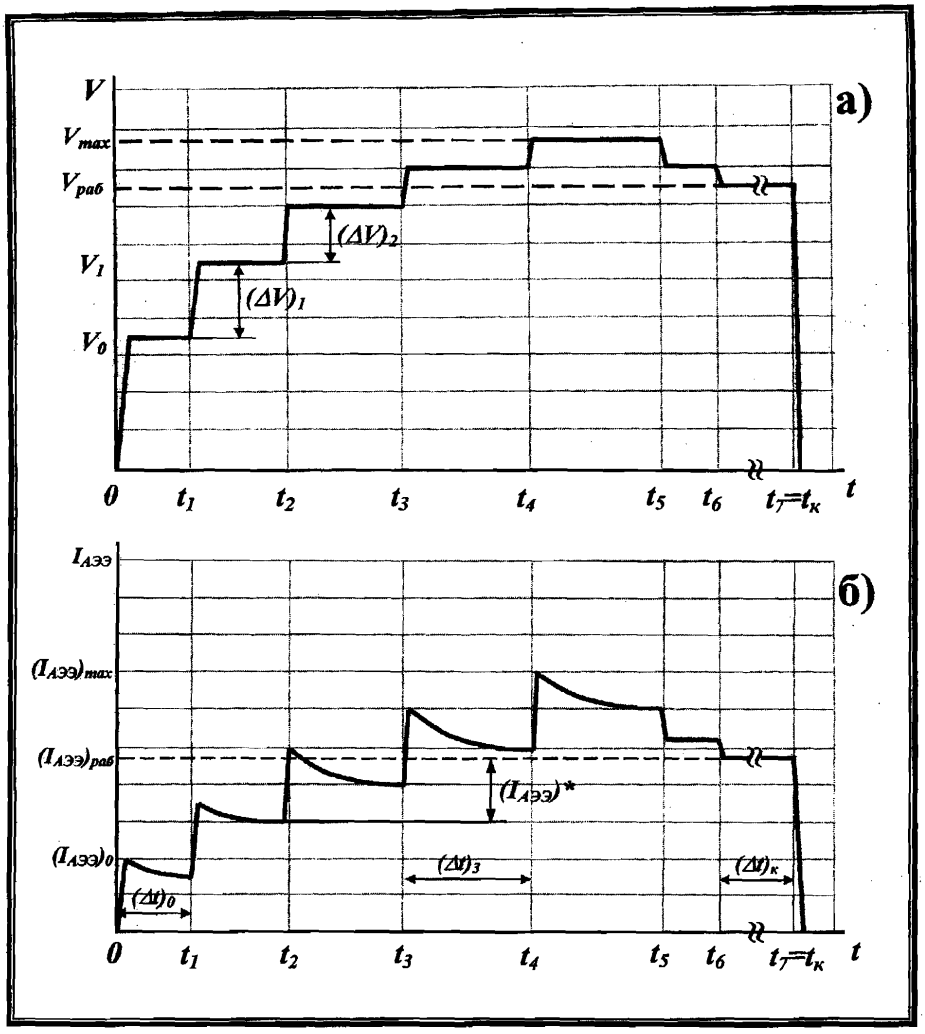

Рис.11. Схематические диаграммы изменения напряжения (а) и автоэмиссионного тока (б) в процессе предварительной тренировки катодов. Режим тренировки соответствует условию $(\Delta I_{АЭЭ})_i$ = const.

специально подобранных) газов, характером и параметрами распыления. Только переход от умозрительных качественных соображений к надежно обоснованным количественным критериям при выборе параметров предварительной тренировки катодов позволит оптимизировать режимы тренировки, надежно автоматизировать этот процесс и получить наилучшие результаты. Рассмотрим теперь второй режим предварительной тренировки, когда фиксируется не шаг подъема напряжения $(\Delta V)_i$, а величина подъема автоэмиссионного тока $(\Delta I_{АЭЭ})_i = (\Delta I_{АЭЭ})^* = const$ при подъеме напряжения (рис. 11) с заданной скоростью $(dV/dt) = (dV/dt)^*$. Так же как и в предыдущем рассмотренном случае, этот параметр, наряду с несколькими другими, должен быть задан количественно. Началом тренировки является плавный подъем напряжения V до величины V_1, соответствующей протеканию в промежутке катод – анод заданного автоэмиссионного тока $(\Delta I_{АЭЭ})^*$. Длительность первого шага тренировки $(\Delta t)_1$, так же как и длительность последующих шагов при подъеме напряжения, определяется достижением заданной скорости спада тока $(dI_{АЭЭ}/dt) = (dI_{АЭЭ}/dt)^*$. И также, как и в предыдущем случае (режиме), подъем высокого напряжения осуществляется до величины $V_{max} \leq V_{раб} \cdot (1 + \rho)$, а переход от качественного, умозрительного подбора параметров режима предварительной тренировки к оптимальному количественному, требует обоснованного выбора основных исходных параметров: $(dV/dt)^*$, $(\Delta I_{АЭЭ})^*$, $-(dI_{АЭЭ}/dt)^*$, ρ, $(\Delta t)_к$.

3. КАТОДНО-МОДУЛЯТОРНЫЕ УЗЛЫ.

3.1. Модуляторы, их роль. Прежде чем совсем кратко рассмотреть вопросы этого и последующих трех разделов (разделы 4, 5 и 6) напомним, что цель этой публикации – обзор состояния работ в области создания катодолюминесцентных источников света, использующих автоэмиссионные катоды. Подчеркнем – именно состояния работ, а не самих работ, поскольку, если бы мы задались целью рассмотреть конкретные конструкции и особенности катодно-модуляторных узлов автоэмиссионных источников электронов, нам следовало бы писать книгу. То же самое относится и к области исследования и использования люминофоров (раздел 5), и к конструкциям преобразователей напряжения (раздел 6). Включены же эти разделы в настоящую публикацию для того, чтобы обозначить все важнейшие составляющие рассматриваемых источников и все проблемы, которые требуется решать при их создании.

Говоря о модуляторе отметим, что его наличие (т.е. реализация триодной конструкции катодолюминесцентного источника света) не является обязательным условием достижения удовлетворительных результатов. Как будет показано ниже, вполне приемлемые результаты были получены в [14] и в диодной конструкции источника света. Тем не менее, наличие модулятора в большинстве случаев является предпочтительным, тогда как в ряде случаев – необходимым. Основное назначение модулятора – смешение электронных потоков, выравнивание распределения плотности потока электронов на люминофор. Другая важная цель – получение возможно больших плотностей автоэмиссионного тока при возможно меньших напряжениях (как мы уже говорили выше, величина напряженности поля над эмиттером с фиксированной кривизной рабочей поверхности и при фиксированном напряжении зависит от расстояния катод – анод; в обсуждаемом случае анодом является модулятор). Типичный вид такой зависимости для конкретного катодно-модуляторного узла (использован многоэмиттерный

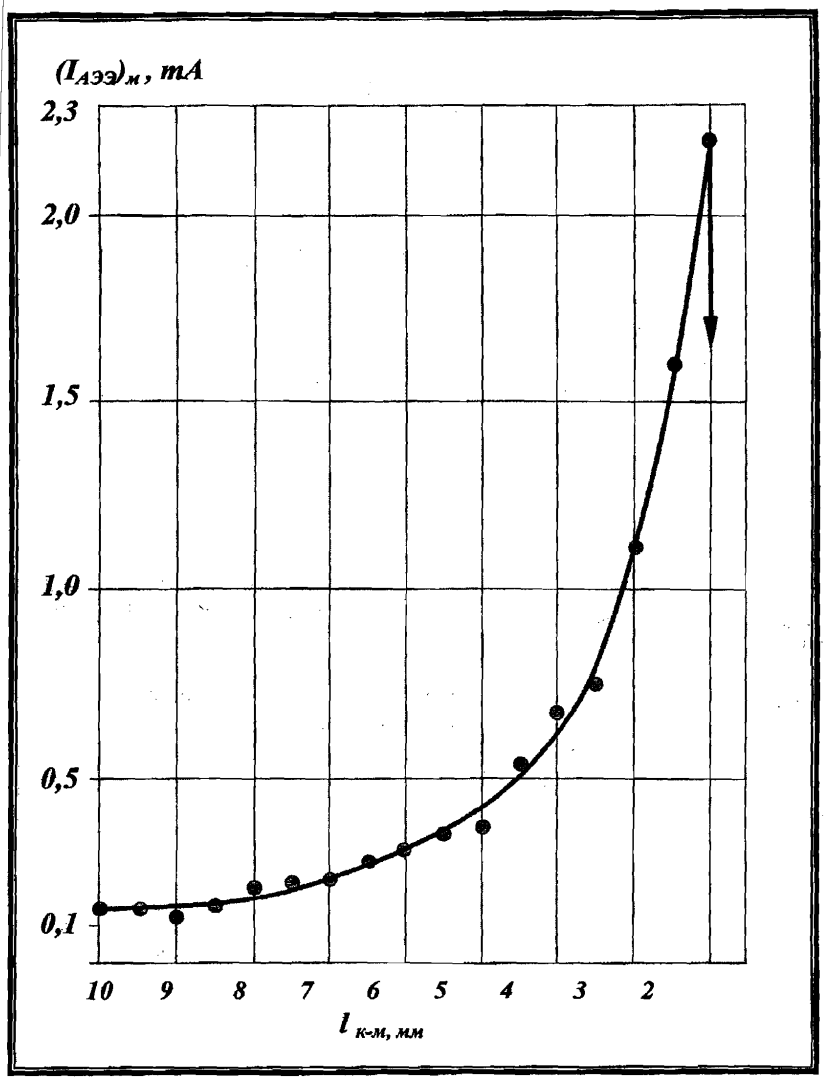

Рис.12. Экспериментальная зависимость величины $(I_{аээ})_м$ автоэмиссионного тока на модуляторе (сетке) от расстояния $l_{к-м}$ катод – модулятор при фиксированном напряжении на модуляторе $V_м$ = 1,5 кВ = const. Катод – пучок углеродных волокон.

Рис.13. Полученное в растровом электронном микроскопе изображение пучка углеродных волокон, обрезанных гильотиной. Виден существенный разброс единичных волокон по длине.

автоэмиссионный катод из одного пучка углеродных волокон) приведен на рис.12. Как видно, ток на модуляторе быстро растет с уменьшением дистанции между ним и катодом. «Обрыв» тока при дистанции $l_{к\text{-}м} \approx 2{,}0$ *мм* соответствует, по-видимому, замыканию одного из углеродных волокон, что, в свою очередь, связано с существенным разбросом волокон по длине при обрезании их пучка гильотиной или бритвой (см. рис.13). А на рис.14 приведена (полученная для той же триодной сборки, что и для рис.12) зависимость величины анодного тока от расстояния катод-модулятор. При этом в обоих случаях измерений напряжение на модуляторе составило $V_м = 1{,}5$ *кВ* = *const*, тогда как напряжение катод – анод в первом случае было равно нулю, а во втором поддерживалось постоянным и составляло $V_{к\text{-}а} = 7{,}0$*кВ*. Прозрачность модулятора (сетки) в данном случае составляла ~ 80%. Приведенные зависимости наглядно демонстрируют роль модулятора, существенную зависимость величины автоэмиссионного тока от расстояния катод-модулятор, а также тот факт, что в использованной конфигурации потери тока на модуляторе составляют 10 ÷ 20%.

3.2. Возможные конструкции. Фактически, все катодно-модуляторные узлы можно условно разделить на два типа, приняв за главный параметр взаимное расположение эмиссионных центров и элементов модулятора. В первом типе некоторые элементы модулятора располагаются непосредственно над частью

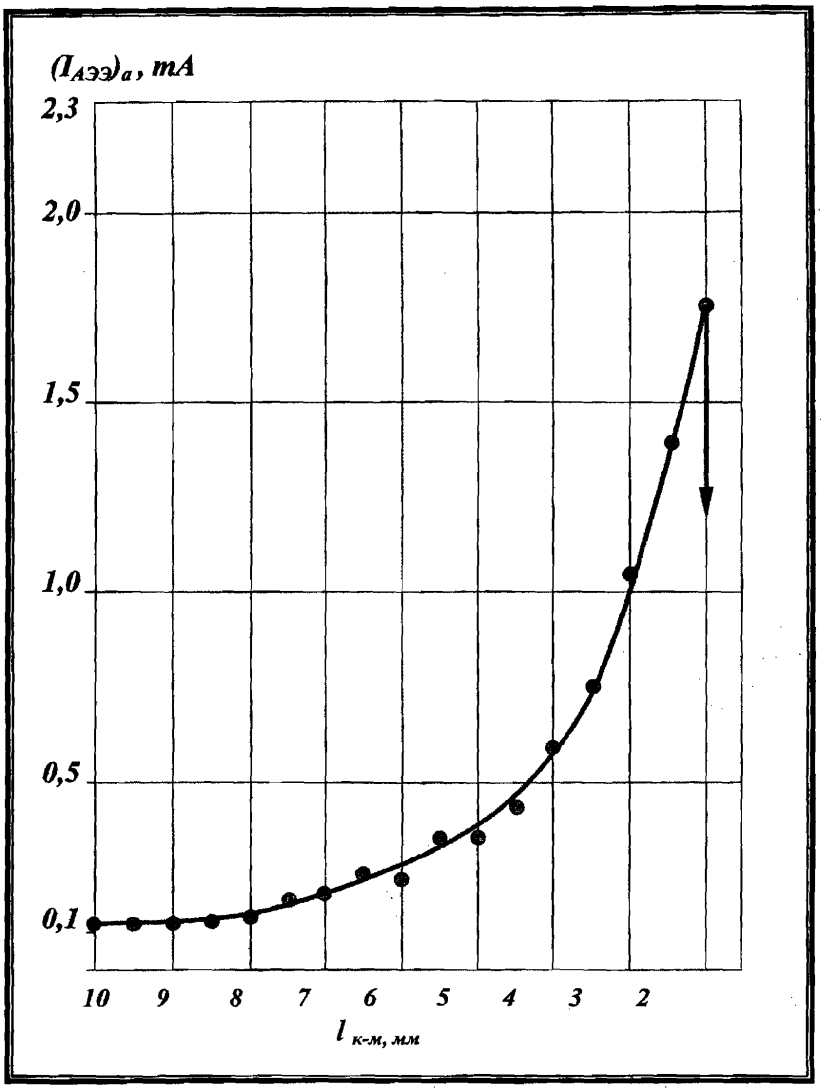

Рис.14. Экспериментальная зависимость величины $(I_{АЭЭ})_a$ автоэмиссионного тока на аноде от расстояния $l_{к-м}$ катод – модулятор при фиксированных напряжениях на модуляторе ($V_м$ = 1,5 кВ = const) и аноде (V_a = 7,0 кВ = const). Измерения проведены на триодной конструкции, что и для рис.12.

эмиссионных центров катода, беря на себя определенную часть тока и снижая, тем самым, коэффициент полезного действия η источника света в целом. Показательным примером узла такого типа является протяженный катод с модулятором – сеткой над ним (см. рис.15а). Потери тока на модуляторе в таких конструкциях зависят, прежде всего, от прозрачности сетки, от натяжения на ней и т.п. Не обойти сеточный модулятор и в случае использования плоских монолитных автоэмиссионных катодов с развитой поверхностью и хаотическим распределением эмиссионных центров (рис.15б). Эффективность работы сеточного модулятора определяется в таких конструкциях и распределением эмитирующих центров по высоте; чем меньше величина разброса высот – тем лучше параметры узла в целом. Во втором типе элементы модулятора не экранируют эмиссионные центры (примеры – рис.15в,г). Важными параметрами модуляторов в конструкциях такого типа являются диаметр отверстий d_0 и толщина модуляторной пластины l_0. В случае использования многоэмиттерных элементов катодов (рис.15в) оптимизация этих параметров обеспечивает работу существенно большего числа эмиссионных центров. Однако, наиболее эффективной, по-видимому (хотя, возможно, и менее технологичной) является конструкция катодно-модуляторного узла, состоящая из матричного набора единичных острий, строго фиксированных по своим параметрам и взаимному расположению с элементами пластинчатого модулятора (рис.15г). В случаях использования линейчатых катодов (плоских наборов элементов катодов с большим числом эмиссионных центров на каждом, либо лезвий) модуляторы могут быть выполнены и в виде сеток, и в виде параллельно натянутых проволочек (рис.15д), и в виде плоских параллельных пластин (рис.15е) и т.д. Наконец, возможны реализации конструкций, объединяющих в себе характеристики катодно-модуляторных узлов первого и второго типа (см., например, рис.15ж).

В заключение этого раздела приведем схему уже упомянутого в разделе 1.2 матричного многоострийного автоэмиссионного катода (катодно-модуляторного узла) так называемого «спиндтовского» типа (по имени его изобретателя Ч.Спиндта [64], см. рис.16). Основным назначением таких катодов является их использование в успешно создаваемых в последние годы низковольтных плоских дисплейных экранах [65,66]. Технология производства таких катодов весьма сложна, однако в настоящее время она детально отработана и при массовом производстве их стоимость будет относительно невысока. Главным недостатком использования таких катодов в катодолюминесцентных источниках света является относительно небольшие величины генерируемых ими токов (мы уже упоминали работу [11], в которой авторы использовали подобный катод в катодолюминесцентном источнике света). В этом смысле достаточно заманчивым является отработка близкой технологии для производства близких по конструкции, но более сильноточных катодно-модуляторных узлов.

4. АНОДЫ.

4.1. Электропроводящие покрытия. К основным характеристикам электропроводящего слоя относятся: его толщина и ее равномерность по площади, прозрачность для света и для электронов, удельное электросопротивление, коэффициент отражения света. Ясно, что эти характеристики определяются, прежде всего, конструкцией источника света (см. рис. 2). В конструкции, соответствующей принципиальной схеме рис.2а, наиболее важной представляется прозрачность проводящего покрытия для света, поскольку именно она обусловливает потери света и, соответственно, снижение эффективности

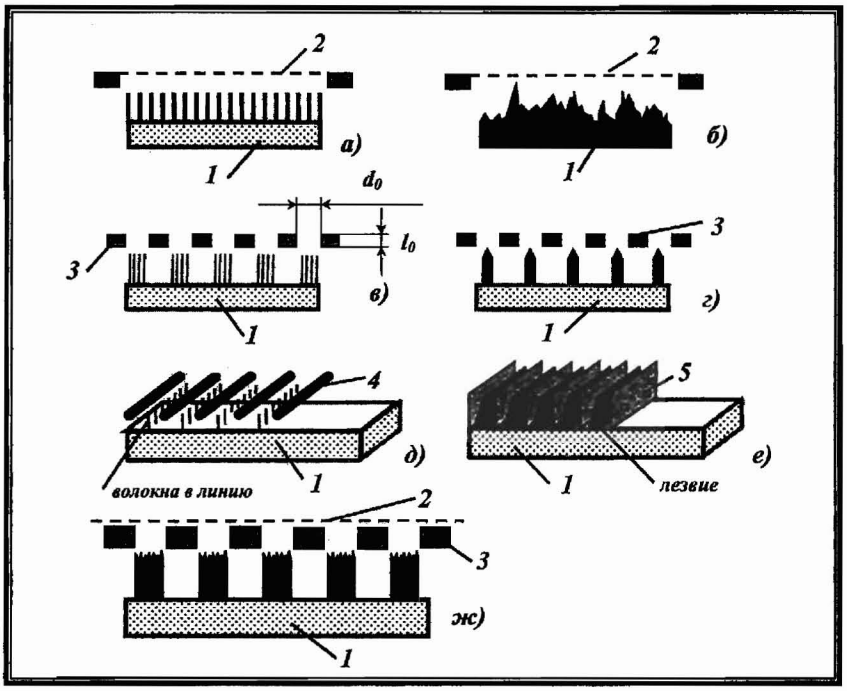

Рис.15. Некоторые конструктивные схемы катодно-модуляторных автоэмиссионных узлов.

Сеточные модуляторы с катодами с хаотично распределенными в пространстве и по высоте эмитирующими элементами – волокнами (*1*) или проволочками (*2*) (*а*) и выступами на монолитной основе (*б*).

Пластинчатые модуляторы с отверстиями над катодами из пучков одиночно расположенных (*в*) и из набора единичных (*г*) эмитирующих элементов.

Проволочные (*д*) или пластинчатые (*е*) модуляторы над катодами из линейчатых эмитирующих элементов (лезвий или «гребенок» волокон).

Комбинация пластинчатых и сеточных модуляторов для катодов из упорядоченно расположенных много-эмиттерных элементов (*ж*).

1 – автоэмиссионный катод;
2 – модулятор-сетка;
3 – пластина с отверстиями;
4 – проволочки;
5 – параллельные пластины.

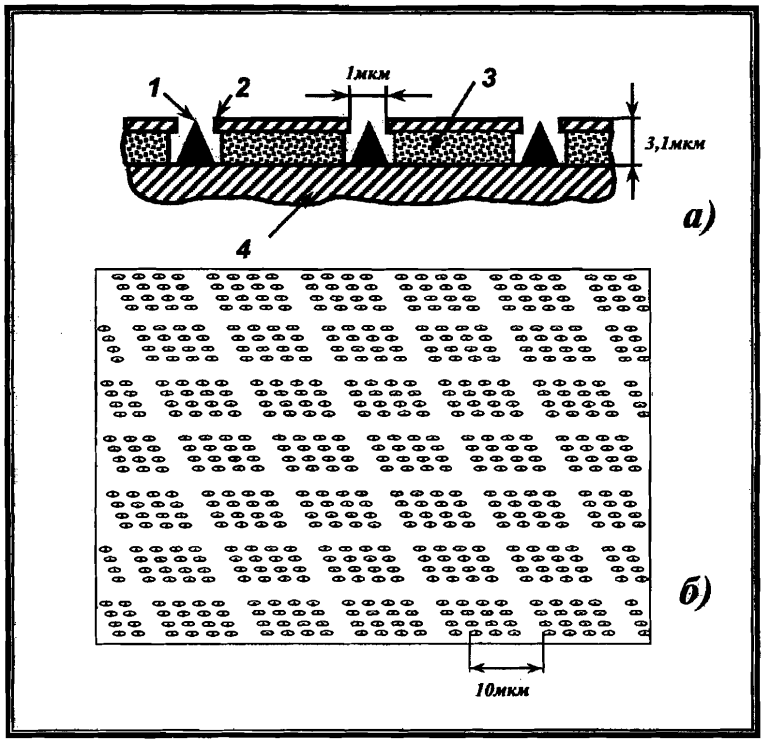

Рис.16. Матричный многоострийный автоэмиссионный катод «спиндтовского» типа для плоского дисплейного экрана (а – схема устройства; б – вид сверху участка катода):
1 – металлическое острие; 2 – металлическая пленочная диафрагма; 3 – изолятор (SiO_2); 4 – кремниевая подложка [4].

источника света в целом. В конструкции рис. 2б оптимум должен быть выбран между возможно более высоким коэффициентом отражения света зеркальным проводящим покрытием и возможно меньшей толщиной покрытия с точки зрения потери в нем энергии электронов. Наконец, при реализации конструкции, соответствующей рис. 2в, толщина зеркального покрытия не имеет значения (точнее, для нее нет предела с большей стороны), и главные требования связаны с качеством зеркальной поверхности. Поскольку улучшение одной характеристики проводящего покрытия в некоторых конкретных конструкциях источников света автоматически подразумевает снижение другой, все они с необходимостью должны быть оптимизированы и подвержены тщательному контролю в процессе

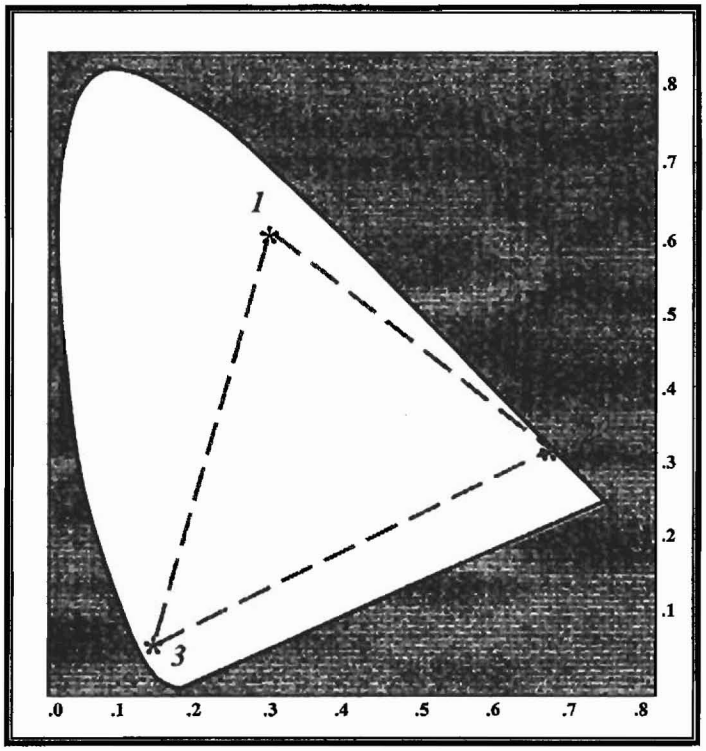

Рис.17. Порошковые катодолюминофоры фирмы «Osram Sybvania» на стандартной цветовой диаграмме.
Стандартные зеленый (1), красный (2) и синий (3) цвета.

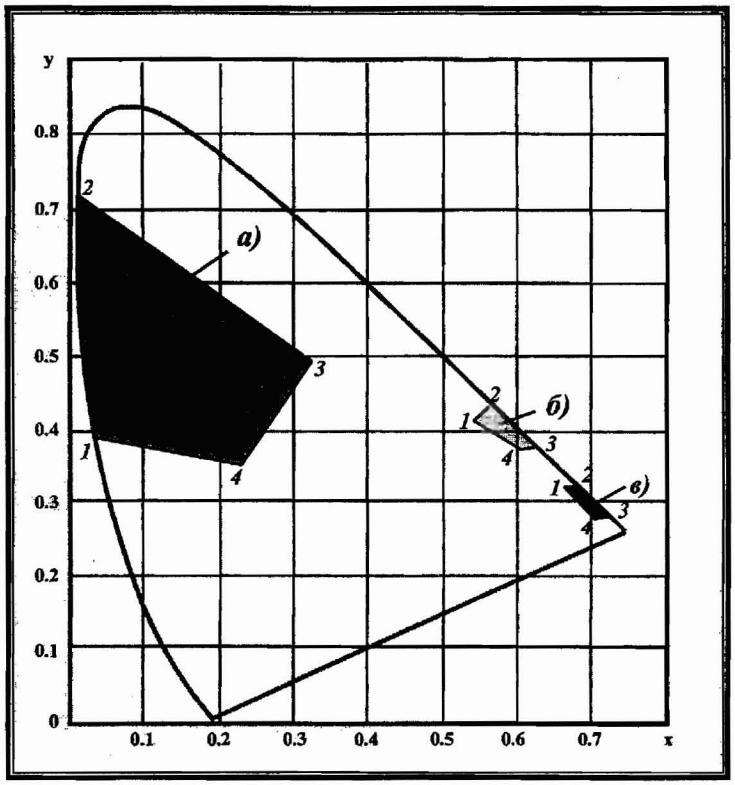

Рис.18. Стандартизированные в России границы цветовых областей для световых сигналов на транспорте (ГОСТ 25695-91).
Затемнены области, соответствующие зеленому (а), желтому (б) и красному (в) цветам. Точные координаты всех вершинных точек каждого цвета также приведены в ГОСТе.

производства. Важность оптимизации обусловлена тем, что умозрительный подход к изготовлению проводящего покрытия (т. е. изготовление покрытия из общих соображений имеющимися под рукой средствами - подход, который имел место в большинстве предшествующих, рассматриваемых здесь работ) может снизить эффективность создаваемого прототипа источника света на десятки процентов.

4.2. Люминофоры. Из всех элементов и узлов рассматриваемых катодолюминесцентных источников света светоизлучающий анодный узел с люминофором является наиболее ответственным, поскольку именно его параметры, параметры люминофора, определяют основные принципиальные ограничения эффективности источников в целом. Сейчас можно уверенно сказать, что именно долговечность люминофора, а не автоэмиссионного катода, определит срок службы источника света рассматриваемого типа. Поэтому выбор наиболее оптимального для решения поставленных задач катодолюминофора, его тестирование, реализация методов и контроль качества нанесения – важнейшая составная часть создания источников света.

В разделе 1.3 мы уже кратко рассмотрели некоторые принципиальные возможности люминофоров. Здесь же еще добавим, что в настоящее время в мире

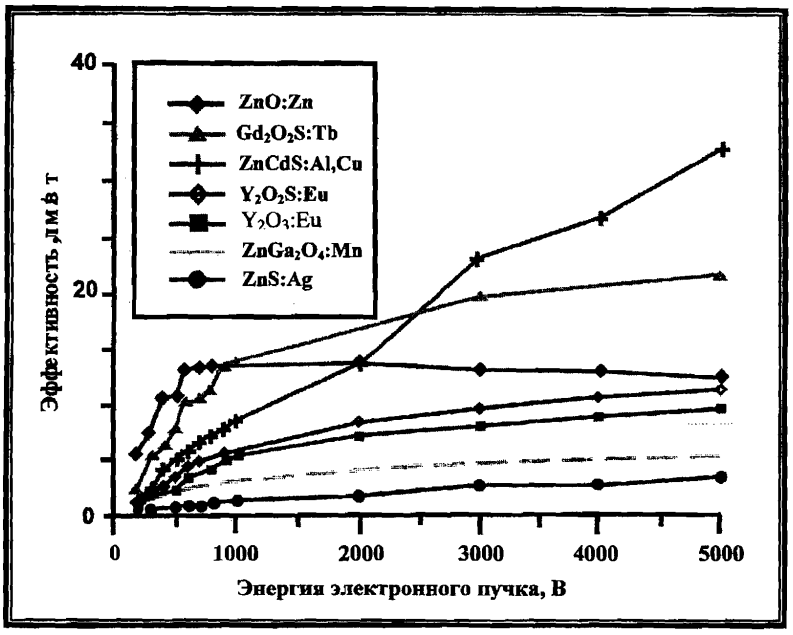

Рис.19. Зависимости практической эффективности от энергии возбуждающих электронов для некоторых дисплейных люминофоров [69].

действует более 30-ти крупных организаций, занимающихся разработкой новых люминофоров. Анализ получаемых в них результатов является весьма обнадеживающим, определяя прогресс в деле разработки новых катодолюминесцентных источников света, стимулируя концентрацию усилий в этом перспективном направлении.

Сегодняшние потребности в люминофорах чрезвычайно высоки. Люминофоры нашли и находят широчайшее применение в технике, промышленности, научных исследованиях. Наиболее широк спрос на люминофоры у производителей различных дисплеев. Достаточно сказать, что только в США имеется более 600 фирм, выпускающих дисплеи различного типа и их элементы. Создано и активно функционирует Общество информационных дисплеев, выпускаются два периодических журнала – "Information Display" и "Journal of the Society for Information Display". В создаваемых дисплеях реализуются различные виды возбуждения люминофоров. Различны в них и требования к цветности, эффективности, времени жизни, другим эксплуатационным параметрам. Однако, несмотря на заметный прогресс в деле разработки новых люминофоров, потребности указанной области, как и других областей использования люминофоров, все еще далеки от удовлетворения.

Как известно, одной из наиболее важных характеристик люминофоров является их цвет, количественно выражаемый координатами на стандартной цветовой диаграмме [3,33] (пример на рис.17). Способ определения этих координат детально изложен, например, в [67,68]. Имея люминофоры трех цветов (см. рис.17) принципиально, путем их смешивания в различных пропорциях, можно получить люминофор любого другого цвета, заключенного на цветовой диаграмме в треугольник, соединяющий эти три исходных цвета. Цветовые диаграммы используют и при стандартизации светотехнических устройств, например светофоров (рис.18). На них зачерненные области указывают наборы допустимых цветов. Другими важными характеристиками люминофоров являются: эмиссионные спектры (зависимость эффективности от длины волны) и время жизни. Для катодолюминофоров к таким характеристикам относятся зависимости эффективности (*лм/Вт*) от энергии возбуждающих электронов (пример – на заимствованном из [69] рис.19), а также предельно допустимые плотности тока электронов.

Чрезвычайно интенсивная работа в области создания эффективных низковольтных люминофоров до настоящего времени не дала серьезного положительного выхода. Созданные и изученные к настоящему времени катодолюминофоры обладают при низких напряжениях весьма низкой эффективностью, хотя и выдерживают существенно большие плотности токов [70]. Кроме того, такие люминофоры обладают сравнительно малым временем жизни.

Из уже созданных катодолюминофоров единицы позволяют достичь эффективности 140 ÷ 150 *лм/Вт* при энергии электронов ~ 10 *кэВ*.Для исследования люминофоров используется весьма современная аппаратура, в значительной степени выпускаемая промышленностью. Принципиальная схема измерительной системы для тестирования катодолюминофоров приведена на рис.20 [71]. Установка имеет набор заменяемых электронных пушек на различные энергии электронов. Используемый хроматометр управляется персональной ЭВМ и позволяет получить координаты изучаемого люминофора на стандартной цветовой диаграмме (рис.17).

Насколько можно судить из литературы, поиски новых люминофоров ведутся, в значительной степени, интуитивно и эмпирически. До сих пор не создано надежной научной базы для прогнозирования свойств люминофоров исходя из их состава и

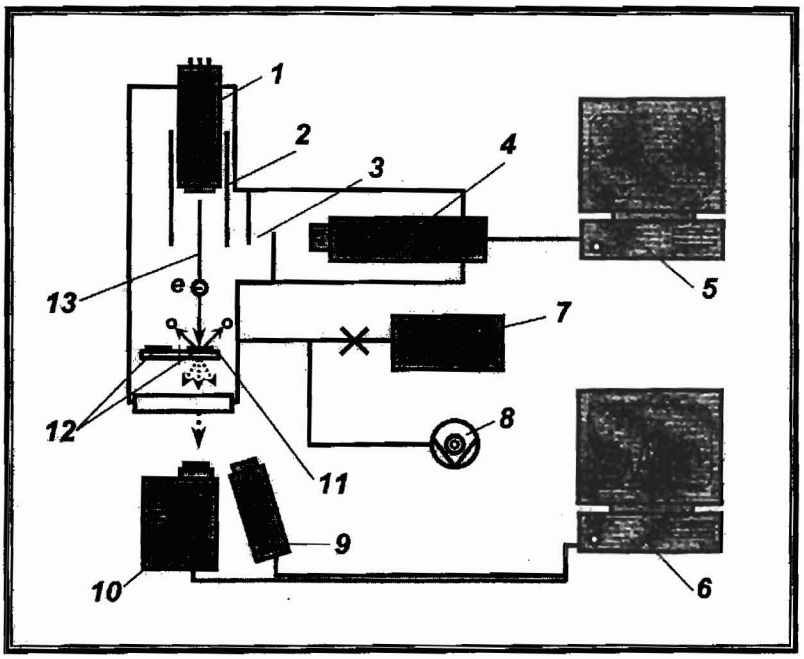

Рис.20. Блок-схема установки для измерения световых характеристик катодолюминофоров [71]:
1 – заменяемые электронные пушки; 2 – магнитный экран; 3 – диафрагмы;
4 – анализатор остаточных газов; 5,6 – персональные компьютеры;
7 – газо-напускная система; 8 – турбомолекулярный насос; 9 – спектрометр;
10 – хроматомер; 11 – вращающийся столик 9 – («карусель»);
12 – проба люминофоров; 13 – пучок электронов.

структуры. Хотя имеется ряд прогрессивных идей. Одна из них, в значительной степени реализованная, создание пленочных люминофоров, обладающих существенно большей устойчивостью к электронной бомбардировке (например, [72].

5. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ.

В зависимости от области применения создаваемого катодолюминесцентного источника света для его питания будет использоваться автономное (аккумуляторное) или сетевое напряжение. И в том, и в другом случаях потребуется, по-видимому, разработка специальных, во многих случаях – малогабаритных преобразователей напряжения. И хотя принципиальных трудностей тут не видно, проработка схемы источника питания как обязательный шаг должна включать оптимизацию его параметров. Основная цель оптимизации – максимальное снижение потерь мощности на источнике. Источник должен иметь высокую надежность, быть устойчивым к колебаниям напряжения в сети, частым включениям, длительной эксплуатации.

6. СИТУАЦИЯ НА СЕГОДНЯШНИЙ ДЕНЬ.

6.1. Что уже сделано. Частично на этот вопрос ответ уже был дан во введении. Здесь мы рассмотрим его более детально.

Большинство работ по созданию катодолюминесцентных источников света на основе автоэлектронной эмиссии было выполнено с использованием углеродных материалов. И в первую очередь необходимо остановиться на использовании в рассматриваемых источниках света катодов из углеродных волокон. Идеология использования углеродных волокон в автоэмиссионных катодах базировалась на том, что они: не требуют специального предварительного заострения (необходимые эмитирующие центры содержит простой излом волокна); весьма устойчивы к бомбардировке ионами остаточных газов, имеющей место в приборах с высоковольтным питанием и работающих в условиях технического вакуума; характер распыления их поверхности обеспечивает динамически устойчивую конфигурацию с наличием значительного числа эмитирующих центров (как было установлено, в указанных условиях эксплуатации эмитирующие центры прекращали свое существование, другие – образовывались вновь, примеры – на рис.21); являются вакуумным материалом; выпускаются промышленностью многих стран и имеют относительно невысокую стоимость. К преимуществам использования углеродных волокон относили и тот факт, что промышленность выпускает их в виде пучков (жгутов) из сотен и даже тысяч единичных волокон.

К настоящему времени в литературе (в первую очередь – в патентной) описано немало конструкций автоэмиссионных катодов на основе углеродных волокон. Так, например, в патенте США № 4 728 851 описан автоэмиссионный катод в эмитирующем устройстве с функцией памяти, состоящий из одного углеродного волокна диаметром порядка 2,0 *мкм* с эмитирующей вершиной, заостренной коронным разрядом до диаметра 0,2 *мкм*. Патент США № 4272699 описывает автоэмиссионный катод для импульсного электронного источника. Катод состоит из жгута углеродных волокон диаметром от 2, 0 до 10,0 *мкм* каждое с эмитирующими поверхностями, полученными простым обрезанием волокон, а не заострением с помощью какой-либо специальной процедуры.

Одним из последних патентов в этой области и, возможно, наиболее полным, является, по-видимому, патент США № 5588893 [73]. Патентуется автоэмиссионный катод и метод его изготовления. Авторы патента отмечают в его описании, что для изготовления катода может быть использован практически любой материал, обладающий достаточной механической прочностью, низкой работой выхода и хорошими вакуумными свойствами. Вместе с тем, они подчеркивают, что предпочтительно, чтобы основным веществом катодов был углерод или вещество с

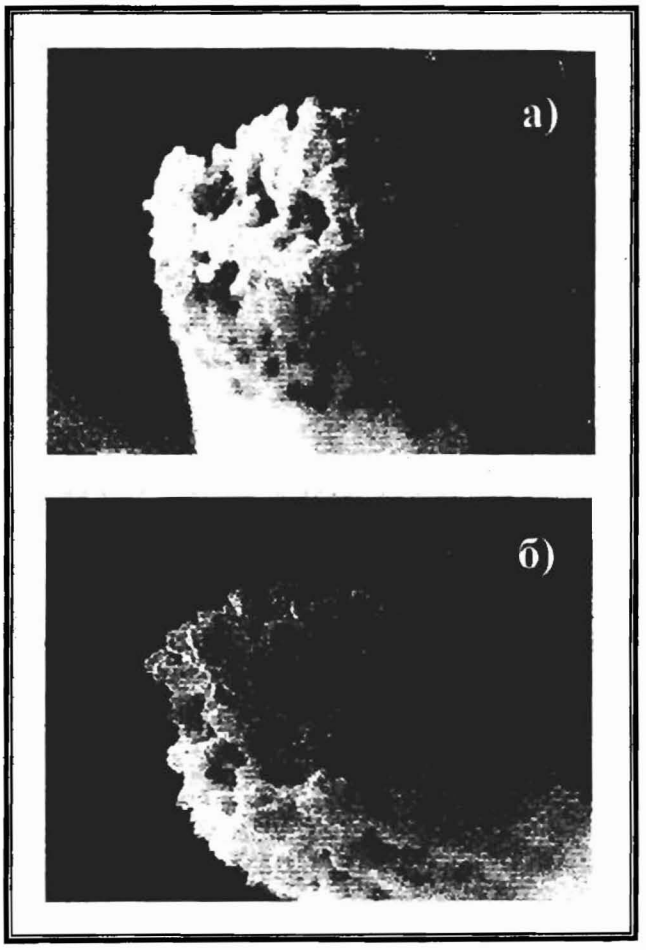

Рис.21. Полученные в растровом электронном микроскопе изображения поверхности единичных углеродных волокон после предварительной тренировки и работы при $V_{а-к}$ = 5,0 кВ (а) и при $V_{а-к}$ = 7,0 кВ (б) в течение 3 часов.

похожими свойствами. Снижения же работы выхода (у углерода, как известно, работа выхода весьма высока, ее среднее значение составляет ~ 4,7 *эВ* [52]) предлагается достигнуть за счет добавления другого вещества, имеющего меньшую работу выхода, в верхние слои эмитирующей поверхности. В качестве одного из путей получения пригодного начального материала для катода предлагается его отжиг для удаления других веществ (например, органики, связывающей отдельные волокна в жгуте) и для возможной «нормализации» его структуры. При этом термин «нормализация» описывается как уменьшение случайных аморфных структур в исходном материале, т. е. подразумевает именно углеродные волокна. Наконец, в описании патента упоминается и предварительная тренировка («формовка») автоэмиссионного катода, сводящаяся к известному постепенному (ступенчатому) подъему высокого напряжения на катоде во время его первого включения. Никаких количественных рекомендаций режимов тренировки в описании патента не приведено.

К настоящему времени создано и описано в литературе несколько прототипов катодолюминесцентных источников света с катодами из углеродных волокон [8-14,74,75]. В качестве показательного примера рассмотрим источники света трех цветов, описанные в [14]. Были использованы стеклянные колбы с размерами, близкими к стандартным лампам накаливания (рис.22). Внутренняя поверхность колб была покрыта прозрачным проводящим покрытием SnO_2 и слоем люминофора, в разных вариантах - зеленого, красного и белого свечения. Толщина и прозрачность проводящего покрытия, как и толщина слоя люминофора, в этой работе не измерялась и не оптимизировалась. Использовались следующие типы люминофоров. Красный люминофор на основе Y_2O_3, легированный *Eu;* его эффективность по теоретической оценке составляла γ = 14,4 *лм/Вт*. Белый люминофор излучает в трех спектральных полосах; он синтезирован на основе силикатов и оксисульфидов с соответствующим легированием: $Y_2O_3S^*(Tb, Mn, Sm)$ и $Y_2Si_2O_5^*(Ce, Tb, Mn)$. Теоретическая оценка эффективности для этого люминофора γ = 11 *лм/Вт*. И, наконец, желто-зеленые катодолюминофоры на основе моноалюминатов и гранатов: $Y_3Al_5O_{12}^*Tb$ и $Y_3Al_3Ga_2O_{12}^*Tb$. Эти люминофоры примечательны тем, что при нагреве их эффективность растет и только после 100^0C падает. Эффективность составляет γ = 40 *лм/Вт* при V = 5,0 *кВ* и превышает 50 *лм/Вт* при V = 10 *кВ*. Все указанные люминофоры можно смешивать для получения требуемой визуальной цветности. Напомним, что использование люминофоров с возбуждением электронным потоком для получения видимого света имеет некоторые важные преимущества: точно определенный спектральный состав (нет линий газового разряда или планковских «хвостов», как это имеет место в случае газоразрядных источников света), высокую спектральную яркость.

Ножки источников света (см. рис.23) имели по 7 изолированных электрических вводов, один из которых служил для подачи положительного потенциала на электропроводящий слой под люминофором, а остальные 6 соединялись с изолированными друг от друга автоэмиссионными катодами - пучками углеродных волокон. Отметим, что модуляторы в этих конструкциях отсутствовали. Работе предшествовала раздельная тренировка каждого из катодов (пучков углеродных волокон), причем тренировка осуществлялась до отпайки колб с вакуумного поста. При работе 6 автоэмиссионных катодов соединялись с общим источником питания через резисторы 1,0 *МОм*, ток в источниках составлял 1,0 ÷ 2,0

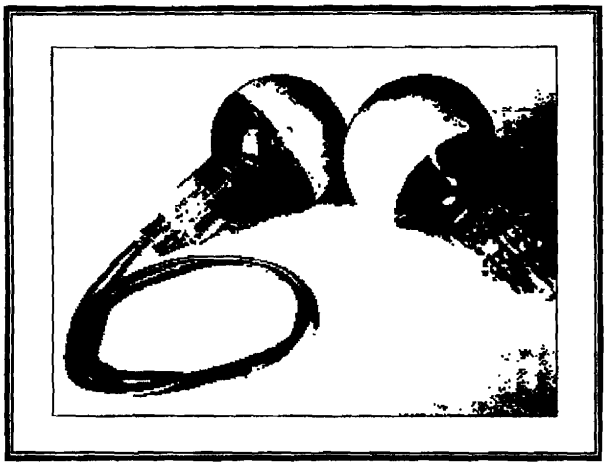

Рис.22. Внешний вид катодолюминесцентных источников света сферической формы диодной конфигурации.

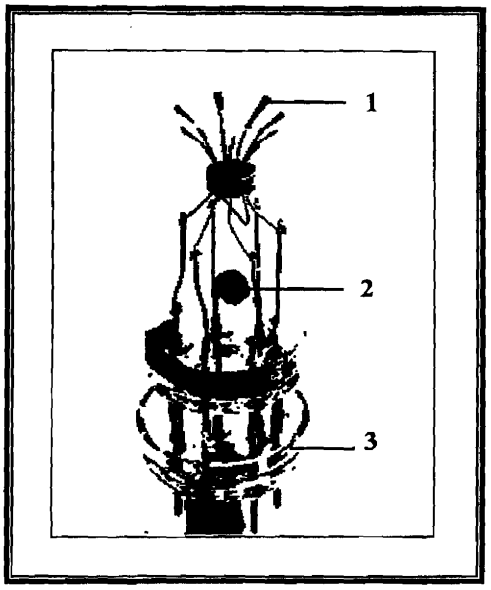

Рис.23. Ножка приведенных на рис.22 источников света с катодом из пучков углеродных волокон : 1 – углеродные волокна, 2 – геттер, 3 – стеклянное основание ножки.

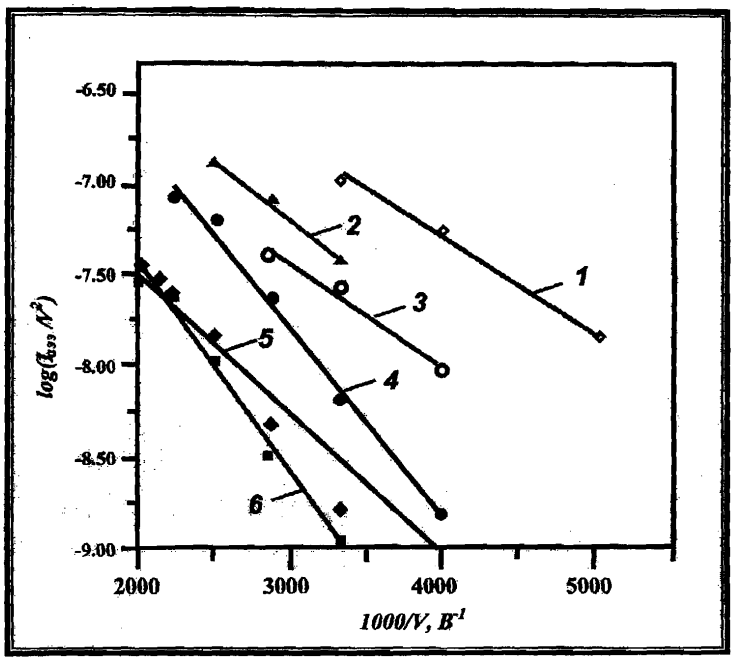

Рис.24. Вольтамперные характеристики (в координатах Фаулера-Нордгейма) автоэмиссионных катодов из пучков углеродных волокон.
1,3 – единичные катоды;
2,4-6 – катоды из шести пучков, причем катод 6 проработал 200 часов.

мА при напряжении 4,0 ÷ 5,0 *кВ*. Характеристики одного из катодов в координатах Фаулера-Нордгейма приведены на рис.24. Светоотдача экспериментальных источников измерялась кремниевым фотоэлементом с учетом его селективной чувствительности для длин волн, излучаемых люминофором. Зависимость светоотдачи люминофоров от энергии возбуждающих электронов представлена на рис.25.

Результатом работы [14] явилось то, что при подводе к созданным прототипам источников света мощности от 4 до 10 *Вт* была достигнута эффективность от γ = 10*лм/Вт* для белого цвета и γ = 12 *лм/Вт* для красного цвета до γ = 30 *лм/Вт* для зеленого цвета. С учетом коэффициента полезного действия η_n использованного преобразователя сетевого напряжения эффективность находится в диапазоне γ = 8÷24 *лм/Вт*. Были проведены испытания отпаянных источников света на долговечность. В течение 600 *часов* как электрические (величина эмиссионного тока), так и световые (световой поток) параметры источников света изменились не

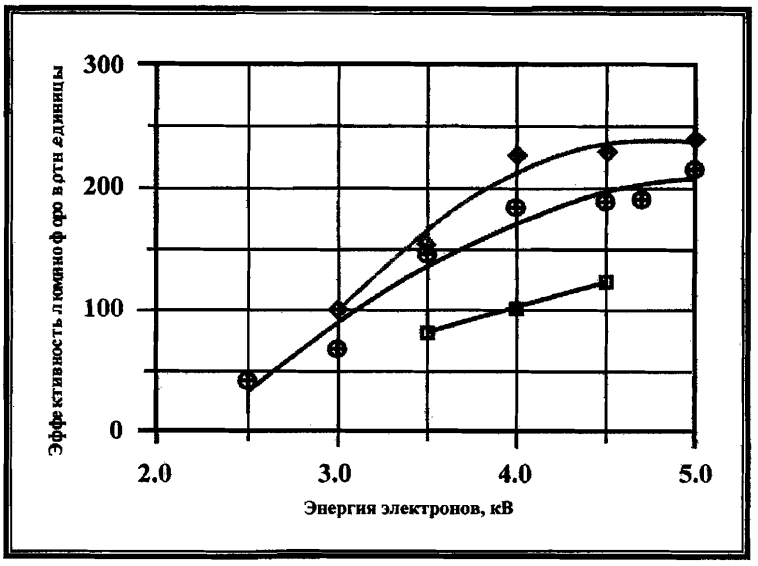

Рис.25. Зависимость эффективности (светоотдачи) люминофоров, использованных в источниках света рис. 23, от энергии возбуждающих электронов.
1 – зеленый люминофор, сразу после включения;
2 – зеленый люминофор, через 200 часов работы;
3 – красный люминофор.

более чем на 3%. Подчеркнем, что в отличие от большинства испытаний на долговечность, в данной работе тестировались параметры источников света в целом, а не параметры автоэмиссионных катодов.

Весьма показательными представляются полученные авторами настоящей работы результаты испытаний на токоотбор автоэмиссионных катодов из единичных углеродных волокон и из их пучков. В вакуумную камеру заряжались последовательно многие одиночные волокна и многие пучки волокон и для каждого из них предпринималась попытка получить автоэмиссионный ток, провести предварительную тренировку и определить значение суммарного тока при одном и том же фиксированном максимальном напряжении катод – анод (анод – плоский металлический диск на расстоянии ~ 2,0 *см* от рабочей поверхности катода), V = =5,0 *кВ*. Было достаточно достоверно выяснено, что в случае испытаний одиночных волокон практически все они (не менее 95%) позволяют получить автоэмиссионный ток величиной в пределах 50 ÷ 250 *мкА*. Подобные испытания катодов из пучков углеродных волокон (не менее 100 волокон в пучке) показали, что примерно в 20% величина тока составляет ~ 500 *мкА* (иногда немного выше), тогда как в остальных

случаях разброс тока в пределах 50 ÷250 *мкА* качественно повторяет ситуацию с одиночными волокнами. Отсюда следует сделать вывод, что использование пучков волокон не дает очевидных преимуществ в плане достижения возможно больших автоэмиссионных токов. В то же время, использование пучков волокон сказывается очевидно отрицательно на параметрах катодов при наличии в конструкции источников света модуляторов, поскольку используемые в известных нам работах методы приготовления пучков (обычно это простое разрезание гильотиной) дают существенный разброс волокон по высоте; сказывается и отклонение многих волокон от оси пучка.

Некоторый, хотя и весьма незначительный, опыт накоплен к настоящему времени в области создания катодов из монолитных углеродных материалов. В работах [76,77] и др. анализировались эмиссионные свойства катодов из плоских

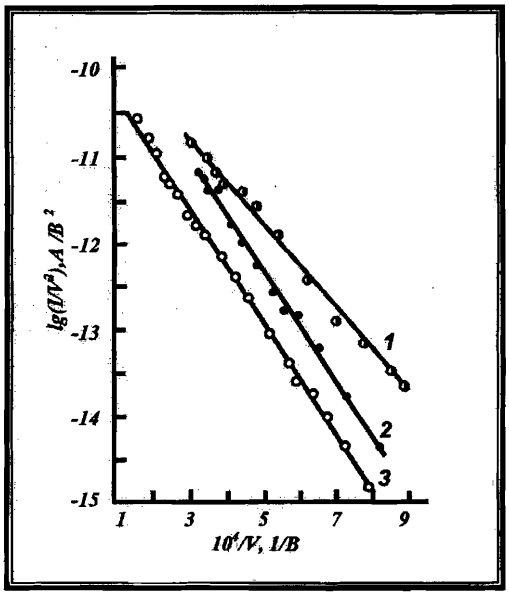

Рис.26. Вольтамперные характеристики (в координатах Фаулера-Нордгейма) графитового многоострийного автоэмиссионного катода, полученного радиационным способом. (Облучение ионами Ar с энергией 100 кэВ, флюенс 2 · 10^{17} ионов/см^2, угол падения пучка ионов на поверхность графита 45°, расстояние катод – анод 2,0 мм): 1 – исходная характеристика; 2 – характеристика после предварительной тренировки в течение 30 мин при среднем токе $I_{ср}$ = 400 мкА и давлении P = 5 · 10^{-6} Тор; 3 – характеристика после работы катода при $I_{ср}$ = 1.0 мкА в течение 1 ч., P = 5 · 10^{-3} Тор

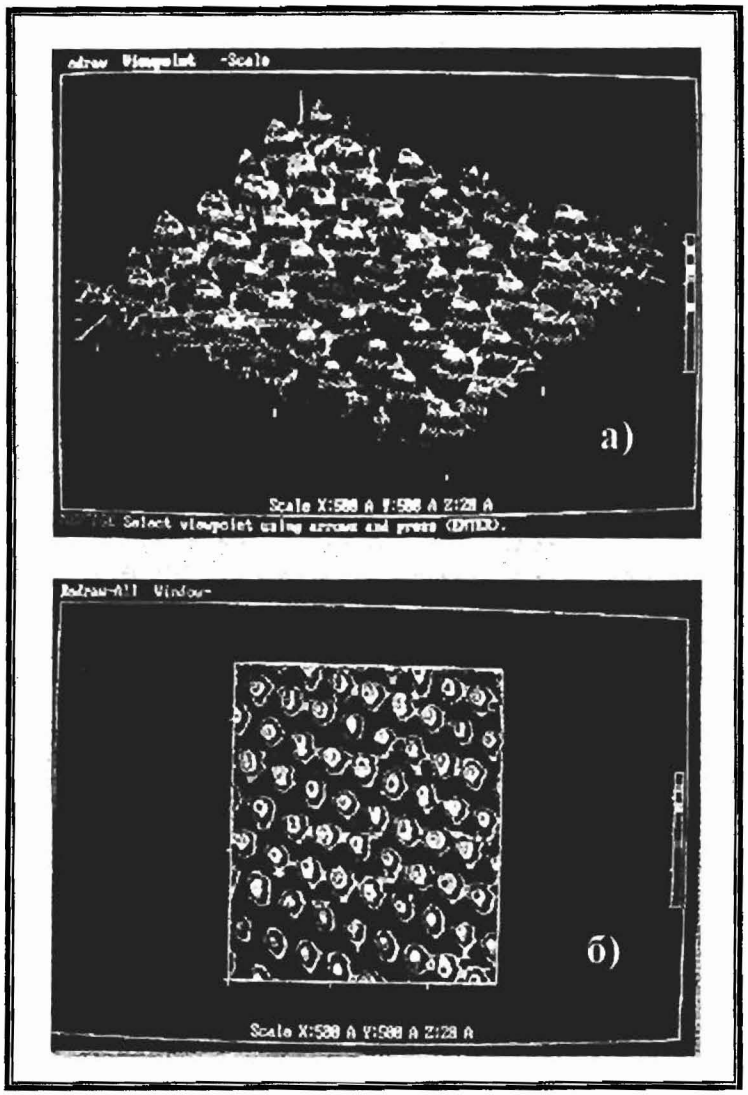

Рис.27. Полученные в сканирующем туннельном микроскопе изображения поверхности высокоориентированного пиролитического графита, облученного ионами Xe^+ с энергией 210 МэВ (изометрия и вид сверху). Видно образование периодической структуры микроострий – единичных эмиссионных центров.

углеродных пластин, подвергнутых различным видам обработки. Наилучшие результаты дала механическая обработка (простой наждачной бумагой), наихудшие – электроэрозионная.

Интересные результаты были получены при использовании радиационных технологий создания или обработки автоэмиссионных катодов из массивных углеродных пластин и пластин высоко ориентированного пиролитического графита [78-80].

Так, в [80], предложен и реализован способ получения плоских протяженных автоэмиссионных катодов из графита за счет облучения исходно отполированной поверхности ионами средних энергий. Показано, что наиболее эффективно для этих целей использование тяжелых ионов газов с энергиями в пределах 50 ÷ 200*кэВ* при интенсивности облучения 10^{14} *ионов/см*^{2}*·с* и флюенсе 10^{17} ÷ 10^{18} *ионов/см*^{2}. Указанные параметры облучения обеспечивают относительно высокие коэффициенты распыления по механизму образования каскадов атомных смещений [81,82] и создание в результате этого развитой (испещренной) поверхности. Проведенный анализ получаемой рабочей поверхности автоэмиссионных катодов в сканирующем туннельном микроскопе [83] выявил образование эмиссионных центров со средней кривизной поверхности в пределах 10 ÷ 100 *нм* и плотностью 10^8 *см*$^{-2}$. Заготовки катодов представляли собой пластины размером 1,0 x 1,0 *см* и толщиной 3,0 *мм*. Материалом служил высокопрочный реакторный графит марки *МПГ-6* [84]. Перед облучением и полировкой рабочей поверхности заготовки отжигались в вакууме при температуре 1000^0*С* в течение 1 *часа*. Облучение пучком ионов (использовались ионы Ar^+, Xe^+ *и* La^+) осуществлялось, в различных случаях, под углами 90, 60 и 45^0 к поверхности заготовки. Типичные вольтамперные характеристики (в координатах Фаулера-Нордгейма) полученных указанным способом катодов приведены на рис.26. Отметим, что измерения проводились в вакуумной камере, расстояние катод – плоский анод составляло 5,0 *мм*. Первая характеристика на рис.26 была получена сразу после подачи на катод высокого напряжения, вторая – после его предварительной тренировки в течение 0,5 *часа* в вакууме 10^{-6} *Торр* при токоотборе 0,8 *мА* и третья – после работы катода в течение 3 *часов* в вакууме 10^{-4} *Торр* при токоотборе 1,5 *мА*. Тот факт, что приведенные вольтамперные характеристики не имеют излома, а также мало отличаются друг от друга, свидетельствует, по-видимому, о подключении в работу при подаче высокого напряжения сразу большинства центров эмиссии. В то же время, наблюдаемая тенденция к смещению вольтамперных характеристик влево (в сторону больших напряжений) в процессе эксплуатации может свидетельствовать о постепенном уменьшении числа центров эмиссии.

Проведенные в [79] измерения долговечности автоэмиссионных катодов и стабильности эмитируемого ими тока показали, что более перспективно использовать при изготовлении катодов облучение тяжелыми ионами газов, нежели ионами металлов. Кроме того, была установлена существенная зависимость долговечности изготовленных указанным способом автоэмиссионных катодов от напряжения их эксплуатации, начиная с определенного напряжения (в среднем на уровне 5,0 *кВ*) срок службы катодов падал от сотен и более *часов* до нескольких *минут*. Логичное объяснение этому – полное разрушение центров эмиссии в результате высокого токоотбора (нагрев катода) и интенсивной ионной бомбардировки его поверхности.

Ясно, что случайное распределение эмиссионных центров в таких катодах по высоте и кривизне поверхности делает возможным использовать для них модуляторы лишь сеточного или проволочного типов (рис. 15б и 15д, соответственно).

Весьма неожиданный и обнадеживающий результат был получен авторами [80]. После облучения поверхности высокоориентированного пиролитического графита ионами Xe^+ с энергией 210 *МэВ* на ней образовалась периодическая структура микроострий (рис.27). Период такой структуры составил ~ 10,0 *нм*, средняя высота выступов – 3,0 *нм*. Возможное теоретическое объяснение такого эффекта дано в [86]. На сегодняшний день установлено, что далеко не на всей поверхности облучаемого материала образуются такие регулярно расположенные эмиссионные центры (микроострия). Необходимо выяснить повторяемость таких результатов, их связь с плотностью и флюенсом облучения, энергией ионов, углом их падения на поверхность графита. Важно также детально прояснить возможное влияние на формируемую периодическую структуру микроострий весьма специфической собственной слоистой структуры пирографита [86,87]. В настоящее время эта работа интенсивно развивается.

В заключение этого раздела остановимся на относительно новом направлении в создании катодолюминесцентных источников света с использованием автоэмиссионных катодов. Связано оно с применением в качестве автоэмиссионных катодов так называемых нанотрубок – вытянутых структур, состоящих, в основном, из шестичленных колец углерода [88,89]. Образование

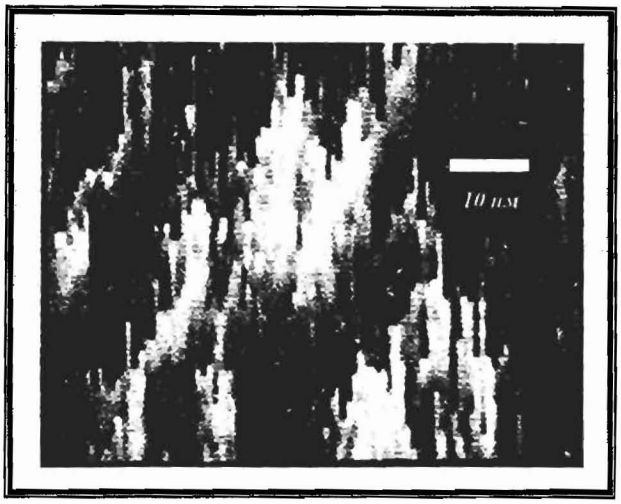

Рис.28. Полученное в сканирующем туннельном микроскопе изображение ансамбля углеродных нанотрубок [92].

нанотрубок осуществляется из графита в дуговом разряде при температуре порядка 3000 *К* в областях, где протекают также процессы формирования других структур из графита – фуллеренов [90] и наночастиц [88]. Технология производства нанотрубок весьма сложна (см. обзор в [91]). При их получении дуговой разряд создается в инертном газе при атмосферном давлении, напряжение между электродами составляет десятки *Вольт*, тогда как расстояние между ними ~ 1,0 *см*; анодом служит графит. Необходимая температура газа достигается при разрядном токе на уровне 100 *А*. Под действием этого тока происходит испарение материала анода. В результате образуются фуллерены, наночастицы и другие частицы сажи, а также нанотрубки (они составляют лишь небольшую часть образуемых продуктов). В результате описанного процесса нанотрубки частично прикрепляются к холодным поверхностям установки, частично осаждаются на других поверхностях вместе с сажей. Длина нанотрубок может достигать нескольких *мкм*, их диаметр составляет несколько *нм*. Нанотрубки могут иметь как открытые, так и закрытые концы.Своими уникальными структурой и свойствами нанотрубки быстро привлекли к себе пристальное внимание специалистов различных областей знаний и технологий, в том числе и в области вакуумной микроэлектроники. Так, авторы [92] впервые оценили эмиссионные свойства изготовленных ими нанотрубок (см. рис.28), сняли вольтамперные характеристики автоэлектронной эмиссии. В [93] был описан автоэмиссионный источник электронов на основе углеродных нанотрубок. В своих последующих работах (см., например, [94]) авторы [92] развили и детализировали идею использования тонкопленочных образований нанотрубок в качестве эффективных катодов на основе автоэлектронной эмиссии. Наконец, в [74,75] был предложен и описан катодолюминесцентный источник света с автоэмиссионным катодом на основе нанотрубок.

Авторы [75] исследовали эмиссионные характеристики многослойных нанотрубок (дистанция между слоями, как и в графите, равна 0,34 *нм*) с закрытыми концами (МСНТЗ), многослойных нанотрубок с открытыми концами (МСНТО) и пучков однослойных нанотрубок (ОСНТ) [91]. Измерения вольтамперных характеристик (см рис.29) проводилось в вакуумной камере при давлении в пределах $10^{-8} \div 10^{-9}$ *Торр*; анодом служила микроканальная пластина [95], расположенная на расстоянии 60 *мм* от автоэмиссионного катода.

Для источника света были выбраны эмиттеры из МСНТО, дающие больший ток при меньших напряжениях (см. рис.29). Конструкция источника света соответствовала схеме рис.2б. Сетка-модулятор располагалась на расстоянии 0,2÷1,0 *мм* от катода, на люминофор (голубой свет, *ZnS·Ag*) со стороны сетки был нанесен слой *Al* толщиной 100 *нм*. Вакуум в отпаянной стеклянной колбе составлял ~ 10^{-8} *Торр*. При расстоянии катод – сетка 0,2 *мм* эмиссионный ток на анод составлял 100 ÷ 200 *мкА* при напряжении на сетке 300 *В* (относительно катода). При таких параметрах достигнутая яркость свечения люминофора была $1{,}5 \cdot 10^4$ *кд/м*^{2}. О величине анодного напряжения авторы [75] не сообщают. Также как не приводят габариты созданного источника света и его эффективность (в *лм/Вт*). Говоря о долговечности источников света, они гарантируют срок службы выше 10000 *часов*, хотя никаких оценок или результатов измерений, на которых основана приведенная цифра, не приводят.

Анализ полученных в [75] результатов и их перспективность может быть оценена только при наличии существенной дополнительной информации и, прежде всего, при знании величины анодного напряжения. Т.е. необходима оценка

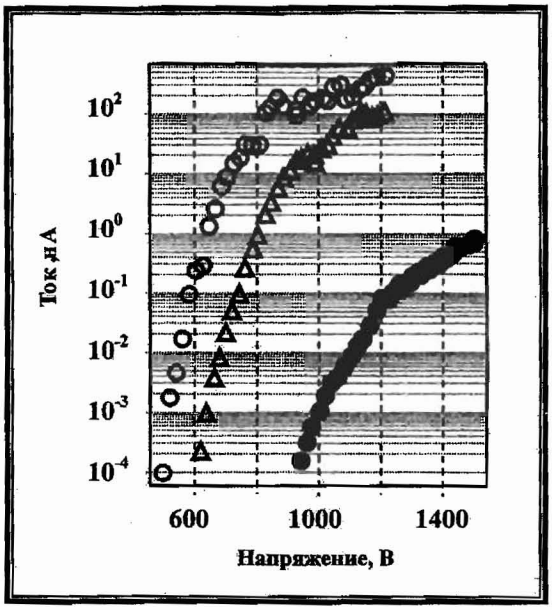

Рис.29. Вольтамперные характеристики автоэмиссионных катодов на основе нанотрубок [75].

○ - многослойные нанотрубки с закрытыми концами

● - многослойные нанотрубки с открытыми концами

△ - пучки однослойных нанотрубок.

радиационной «нагрузки» материала автоэмиссионного катода. Однако, уже сейчас можно предположить, что рассмотренные катодно-модуляторные узлы на основе нанотрубок, по-видимому, более технологичны по сравнению с узлами аналогичного типа на основе углеродных волокон. Окончательный же вывод делать, на наш взгляд, преждевременно; на данном этапе мы не можем сравнить стоимость источников света с катодами двух упомянутых типов. Весьма вероятно, что оптимальным для автоэмиссионного катода окажется третий материал, который никто пока не обсуждает. Т.е. поиски продолжаются.

6.2. Что осталось невыясненным. Ни в коей мере не отрицая полезности и важности выполненных к настоящему времени работ в рассматриваемой области, следует, на наш взгляд, признать, что работы эти крайне не систематичны, и что количество вопросов, которые они поставили, существенно превышает количество ответов, которые они дали. Авторы с достаточно легким сердцем критикуют указанные работы, поскольку сами являются активными участниками многих из них.

Зададим себе и другим простые вопросы.

Почему в качестве перспективных материалов автокатодов до сих пор рассматривались только углеродные материалы? Разве нельзя реализовать кластерное распыление практически любого другого материала? Разве нельзя направленно создать и сколь угодно долго поддерживать за счет оптимизированного состава материала катода, состава остаточных (или специально подобранных) газов и правильно выбранного напряжения (энергии бомбардирующих рабочую поверхность катода ионов) поверхность, содержащую достаточное количество эмиссионных центров? Разве обладает углерод удовлетворительными эмиссионными свойствами? Разве нет более подходящих вакуумных материалов?

Если использование углеродных волокон дает обнадеживающие результаты, то почему до сих пор не получена детальная информация о процессах, уже используемых как важные технологические операции? Причем указанная информация не просто еще не получена, а нет даже попыток ее получить. Что дает, помимо очистки от связующей органики, отжиг углеродных волокон? Какова структура волокон? – кроме общих фраз о нормализации структуры мы ничего не знаем. Почему не использовался рентгеноструктурный анализ? Почему не анализировался химический состав волокон? Почему не измерено и не оценено количество расходуемого (распыляемого) материала катода в зависимости от времени его эксплуатации? Почему не проанализирован даже характер распыления углерода? Влияет ли и как попадание распыляемого материала на люминофор? Почему, наряду с признанием необходимости и важности предварительной тренировки автоэмиссионных катодов, нет даже попыток развития количественного, научно обоснованного подхода к реализации этого процесса? Неужели эмпирический подбор режимов наиболее оптимален? Наконец, по каким критериям (и почему именно по ним, если они частично и называются) осуществляется поиск и выбор типа углеродного волокна? И не предпочтительнее ли использование одиночных волокон? И не удастся ли достигнуть тех же результатов или превысить их, заменив углеродные волокна на волокна из других материалов или на металлические проволочки?

Прорабатывалась ли серьезно конструкция катодно-модуляторного узла для источника света? Нужно ли заранее соглашаться с заметными потерями автоэмиссионного тока (т.е. эффективности источника света) на модуляторе-сетке? Почему не ведется (и как нам представляется – серьезно даже не начата) работа по поиску оптимальной конфигурации источника света рассматриваемого типа? Ведь уже сейчас просматриваются весьма обнадеживающие решения; почему же к их анализу не привлечены специалисты?

В «полной» тени находится вопрос об электропроводящем анодном покрытии. Почему? Разве не очевидно, что его оптимальное решение может дать выигрыш в эффективности не только на проценты, но и на десятки процентов? И разве не очевидно, что коль скоро мы пытаемся создать хороший прибор в целом, мы должны сразу, одновременно вести работу на всех направлениях, отрабатывать и оптимизировать все узлы в комплексе? Разве можно спорить с тем, что ни создание уникального катодно-модуляторного узла на основе автоэлектронной эмиссии материалов, ни разработка нового, высокоэффективного, низковольтного, долгоживущего люминофора – еще не есть создание перспективного для широкого использования, конкурентоспособного катодолюминесцентного источника света?

И, наконец, важнейший вопрос – люминофоры. Почему оптимизация их выбора, технологии изготовления, нанесения, контроля и т.п. – применительно именно к

создаваемому источнику света, откладывается? И еще раз – разве не очевидно, что все вопросы, связанные и с катодно-модуляторным узлом, и с анодным узлом, и с общим конструктивным решением источника света - взаимосвязаны? И разве не ясно, что они теснейшим образом связаны с той областью применения, для которой источник создается?

6.3. Видимые пути развития работ. Правильным ответом на поставленные выше, возможно в несколько эмоциональной форме, вопросы представляется принципиальное изменение характера работ в рассматриваемом направлении и их активизация. Уже пройденный к настоящему моменту путь и полученные на нем результаты достаточно убедительно, на наш взгляд, доказывают принципиальную перспективность создания катодолюминесцентных источников света с использованием автоэлектронной эмиссии материалов. Дальнейшее развитие работ необходимо проводить комплексно, широким фронтом, решая все приведенные выше вопросы параллельно. Только теснейшее сотрудничество специалистов различных профилей, только концентрация их усилий на решении конкретных задач – создании источников света четко определенного назначения – может обеспечить успех. Настоящая публикация, в значительной мере, - приглашение к такому сотрудничеству.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматгиз, 1958.
2. Ненакалиевыемые катоды / Под.ред. М.И.Елинсона. М.: Советское радио, 1974.
3. Справочная книга по светотехнике / Под.ред. Ю.Б.Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1995.
4. Brodie I., Spindt C.A. Vacuum Microelectronics. Adv. Electron. Electron. Phys. 1992, V. 83, PP.2-107.
5. Иванов А.П. Электрические источники света. М.: Госэнергоиздат, 1948.
6. Anderson J.M. The electric lamp: 100 years of applied physics. // Phys. Today, October 1979, P.3.
7. Nosaka E. Cathode ray tube used as light source. US Patent N 4344017, August 1982.
8. А.с. 1306397 СССР, кл. H01J 63/06 от 25.07.1985. Электровакуумный источник света/Бондаренко Б.В., Браверман И.Я., Дмитриева В.Н., и др..
9. А.с. 1417708 СССР, кл. H01J 29/46 от 27.07.1986. Электронно-лучевой источник света/Бондаренко Б.В., Меерович Г.А., Петрушенко Ю.В. и др.
10. А.с. 1508866 СССР, кл. H01J 63/06 от 22.07.1987. Электровакуумный источник света/Браверман И.Я., Меерович Г.А., Уласюк В.Н. и др.
11. Kondo Yu., Matsuura J., Kimura H. Characteristics of field emitter arrays for light source. // The fourth International Vacuum Microelectronics Conference (IVMC'91), August 22-24,1991, Nagahama, Japan, Technical Digest, PP. 56-57.
12. Sheshin E.P., Suvorov A.L., Grigoriev V.A., Sheshjorkin V.J. Light source on the basis of multitip field emission cathode from carbon materials. // The Sixth International Vacuum Microelectronics Conference (IVMC'93), July 12-15, 1993 Newport, Rhode Island, USA, Technical Digest, PP.117-118.
13. Sheshin E.P., Suvorov A.L., Bobkov A.F., Dolin D.E. Light source on the basis of carbon field electron cathodes: design and parameters. // The Seventh International Vacuum Microelectronics Conference (IVMC'94), July 4-7,1994, Grenoble, France, Revue "Le Vide, les Couches Minces" – Supplement au N 271 Mars-Avril 1994, P.423-426.
14. Chubun N., Lazarev N., Sheshin E., Suvorov A. Vacuum fluorescent light source with carbon fibers field emission cathode. // Eighth International Vacuum Microelectronics Conference (IVMC'95), July 30- August 3,1995 Portland, Oregon, USA, Technical Digest, P.516.
15. Spindt C.A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E.R. Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones. // J.Appl.Phys. 1976,V. 47, PP.5248.
16. Углеродные волокна / Под ред. С. Симамуры. М.: Мир, 1987.
17. Углеродные волокна и углекомпозиты / Под ред. Э.Фитцера. М.: Мир, 1988.
18. Donnet J.-B., Bansal R.C., Carbon fibers. N.-Y.: Marcel Dekker Inc., 1990.
19. Конкин А.А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. М.: Химия, 1974.
20. Азарова М.Т. Высокопрочные высокомодульные углеродные волокна. Химические волокна, 1991, № 3, С.5.
21. Pierson H.O. Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes. Properties, processing and applications/ Park Ridge, New Jersey: Noyes Pull., 1992.
22. Baker F.S., Osborn A.R., Williams J. Field emission from carbon fibres: a new electron source. // Nature, 1972, V. 239, Sept.8, PP.96-97.

23. Baker F.S., Osborn A.R., Williams J. The carbon-fibre field emitter. // J.Phys.D: Appl.Phys., 1974, V. 7, PP.2105-2115.
24. Mousa M.S. Electron emission from carbon fibre tips. // Appl. Surf. Sci., 1996, V. 94/95, p.129.
25. Бондаренко Б.В., Рыбаков Ю.Л., Шешин Е.П. Автоэлектронная эмиссия углеродного волокна. // Радиотехника и Электроника, 1982, Т.27, № 8, С.1593.
26. Бондаренко Б.В., Селиверстов В.А., Шешин Е.П. Эмиссионные свойства углеродных волокон различной температуры обработки. // Радиотехника и Электроника, 1985, Т.30, № 8, С.1601.
27. Бондаренко Б.В., Писаренко Ю.В., Шешин Е.П. Флуктуации автоэмиссионного тока катодов из углеродного волокна. // Радиотехника и Электроника, 1986, Т.31, № 10, С.2056.
28. Бондаренко Б.В., Шаховской А.Г., Шешин Е.П. Динамика эмитирующей поверхности углеродно-волоконных автокатодов. // Радиотехника и Электроника, 1987, Т.32, № 1, С.199.
29. Долин Д.Е., Сосунов А.А., Суворов А.Л., Шешин Е.П. Устойчивость поверхности углеродных волокон к бомбардировке низкоэнергетичными ионами газов. // ЖТФ, 1990, Т.60, № 12, С.115.
30. Фиалков А.С., Осипов Н.И., Анаскин И.Ф., Куприкова Н.Д. Автоэмиссионный источник электронов из углеродного волокна. // ПТЭ, 1980, № 3, С.238.
31. Prohaska R., Fisher A. Field emission cathodes using commercial carbon fibers. // Rev. Sci. Instrum., 1982, V.53, N 7, P.1092.
32. Марковский Л.Я., Пекерман Ф.М., Петошина Л.Н. Люминофоры. М.: Химия, 1966.
33. The Phosphor Handbook / Eds. S.Shionoya, W.M.Yen. Florida: CRC Press Inc.,1997.
34. Janietz S., Friedrich R., Wedel A. Synthesis and electrochemical characterization of new sulfur containing polymers and their application in LED's. // European Conference on Molecular Electronics (ECME'97) July 7-10, 1997, Cambridge University, England.
35. Мюллер Э.В., Цонг Т.Т. Автоионная микроскопия. Принципы и приложения. М.: Металлургия, 1972.
36. Мюллер Э.В., Цонг Т.Т. Полевая ионная микроскопия. Полевая ионизация и полевое испарение. М.: Наука, 1980.
37. Бом Д. Квантовая теория. М.: Наука, 1965.
38. Брэндон Д. Удары молекул газа о поверхность, полевое травление и деформация под действием поля. В сб.: Автоионная микроскопия / Под ред. Дж. Рена и С. Ранганатана. М.: Мир, 1971, гл.4, С.59.
39. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. Л.: Наука, 1972.
40. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974.
41. Березняк П.А., Слезов В.В. Расчет характеристик ионного потока, бомбардирующего вершину игольчатого эмиттера. // Радиотехника и Электроника, 1972, Т.17, С.354.
42. Walls J.M., Boothby R.M., Soathworth H.N. Field ion microscope observation of helium ion bombardment damage in tungsten. // Surf.Sci., 1976, V.61, P.419.
43. Федорова Л.И., Михайловский И.М.,Полтинин Л.Я. Влияние низкоэнергетичной бомбардировки ионами гелия на эрозию поверхностных слоев микрокристаллов молибдена. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1985, Вып.1(34), с.55.
44. Суворов А.Л., Квинтрадзе В.И. Радиационные свойства субатомных пленок на поверхности металлов. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика

радиационных повреждений и радиационное материаловедение. М.: ЦНИИАтоминформ, 1989, Вып. 2(49), С.52.
45. Суворов А.Л. Структура и свойства поверхностных атомных слоев металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
46. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. / Под ред. Р.Бериша. М.: Мир, 1984 (т.1), 1986 (т.2).
47. Беграмбеков Л.Б. Эрозия и трансформация поверхности при ионной бомбардировке. // Итоги науки и техники. Сер.: Пучки заряженных частиц и твердое тело. М.: ВИНИТИ, 1993, Т.7, С.4.
48. Сокольская И.Л. Применение автоэмиссионного микроскопа для изучения поверхностной диффузии и самодиффузии. В сб.: Поверхностная диффузия и растекание. М.: Наука, 1969, С. 108.
49. Суворов А.Л. Автоионная микроскопия радиационных дефектов в металлах. М.: Энергоиздат, 1982.
50. Шредник В.Н. Термополевые и конденсационные формы роста кристаллов-острий, изучаемые методами автоэмиссионной микроскопии. В сб.: Рост кристаллов. М.: Наука, 1980, Т.13, С.68.
51. Ривьере Х. Работа выхода. Измерения и результаты. В сб.: Поверхностные свойства твердых тел / Под ред. М.Грина. М.: Мир, 1972, гл.4, С.193.
52. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1981.
53. Суворов А.Л. Автоэлектронная микроскопия и эмиссионные свойства урана (пленочная система). // Реакторное материаловедение. М.: ЦНИИАтоминформ, 1978, т.3, С.162.
54. Суворов А.Л., Савицкий Е.М., Буров И.В., Литвак Л.Н. Автоэлектронная микроскопия сплава Nb-La. // Сплавы редких металлов с особыми физическими свойствами. М.: Наука, 1979, С.236.
55. Ионная имплантация /Под. ред Дж.К. Хирвонен. М.: Металлургия, 1985.
56. Ван дер Зил. Шумы и их применения. М.: Мир, 1979.
57. Kleint Ch. Surface diffusion model of adsorption – induced field emission flicker noise. // I. Theory. Surf. Sci., 1971, V.25, p.394.
58. Gomer R. Surface diffusion and field emission current fluctuations. // Surf. Sci., 1973, V.38, P.373.
59. Swanson L.W. Current fluctuations from various crystal faces of a clean tungsten field emitter. // Surf. Sci., 1978, V.70, P.165.
60. Беккерман А.Д., Джемилев Н.Х., Ротштейн В.М. Эмиссия крупных гетероядерных кластерных ионов при распылении графита ионами цезия. // Письма в ЖТФ, 1993, Т.19, № 6, С.52.
61. Беккерман А.Д. Сравнительные исследования образования и фрагментации положительно и отрицательно заряженных гомо- и гетероядерных кластеров при распылении C, Al, Si, V и Cu ионами Xe^+, O_2^+ и Cs^+. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Ташкент, 1994, Ин-т электроники.
62. Джемилев Н.Х. Образование и фрагментация заряженных кластеров при ионной бомбардировке поверхности твердых тел. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук, Ташкент, 1994.,Ин-т электроники.
63. Бондаренко Б.В., Баканов Е.С., Черепанов А.Ю., Шешин Е.П. Влияние формовки на структуру углердных автокатодов. // Радиотехника и Электроника, 1985, Т.30, № 11, С. 2234.
64. Spindt C.A. A thin film field emission cathode. // J. Appl. Phys., 1968, V.39, P.3504.

65. Meyer R., Ghis A., Ramband P., Muller F. Microchip fluorescent display. Proc Japan Display, 1985, P.513.
66. Spindt C.A., Holland C.C., Brodie I. Et. al. Field emitter arrays applied to vacuum fluorescent display. Euro-display Conference 1987 and IEEE Trans. On E-D, 1989, V.ED-36, P.225.
67. Джадд Д., Вышецкий Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978.
68. Lighting Handbook, N.-Y.: IESNA, 1993.
69. Jacobson S.M. Phosphors for full-collor low-voltage FEDs. // The First International Conference on the Science and Technology of Display Phosphors. November 14-16, 1995, San Diego, California, USA. Extended Abstracts, P.213.
70. Peterson R.O. Low voltage (~ 300V) cathode-luminescent properties of red, green and blue phosphor materials. // The First International Conference on the Science and Technology of Display Phosphors. November 14-16, 1995, San Diego, California, USA. / Extended Abstracts, P.11.
71. Chakhovskoi A.G., Malinowski M.E., Talin A.A. et. al. Characterization of the novel powder and thin film RGB phosphors for field emission display applications. // 9th International Vacuum Microelectronics Conference (IVMC'96), July 7-12, 1996, St. Petersburg, Russia. Technical Digest, P.614.
72. Gibbons C.S., Smith D.W., Jing X. New blue-emitting phosphor thin film for FEDs. // The Second International Conference on the Science and Technology of Display Phosphors, November 18-20, 1996, San Diego, California, USA. Extended Abstracts, P.277.
73. United States Patent 5588893, December 31, 1996 Field emission cathode and methods in the production thereof/Kaftanov V.S., Suvorov A.L., Sheshin E.P.
74. Saito Y., Hamaguchi K., Nishino T et. al. Field emission patterns from single-walled carbon nanotubes. Japan // J. Appl. Phys., 1997, V.36, P.L1340.
75. Saito Y., Hamaguchi K., Mizushima R. et. al. Field emission from carbon nanotubes and its application to cathode ray tube lighting elements. // The Second International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC'98), July 7-10, 1998, Tsukuba, Japan. Technical Digest, P.9.
76. 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.
77. Бондаренко Б.В., Шешин Е.П., Макуха В.И., Титов Ю.В. Автокатоды с большой рабочей поверхностью. // Электронная техника, Сер.1: Электроника СВЧ, 1986, Вып.4, С.47.
78. Suvorov A.L., Protasenko V.V., Stolyarova V.G., Sheshin E.P. Using of scanning tunneling microscopy for control and revision of strong rifle surfaces of plane carbon field emitters modified by ion beams. // Third International Conference on Nanometer-scale Science and Technology (NANO-3), October 24-28,1994, Denver, Colorado, USA. Final Program and Abstracts, P.306.
79. Суворов А.Л., Шешин Е.П., Протасенко В.В. и др. Микрошероховатые плоские автоэмиссионные катоды из графита, полученные радиационным способом. // ЖТФ, 1996, Т.66, № 7, С.156.
80. Suvorov A.L., Didek A.Yu., Cheblukov Yu.N. et. al. Formation of periodic multi-tip relief of pyrolithic graphite by high energy ions irradiation. // 43rd International Field Emission Symposium (IFES'96), July 14-19, 1996, Moscow, Russia. Program and Abstracts, P.P-90.

81. Лейман К. Взаимодействие излучения с твердым телом и образование элементарных дефектов. М.: Атомиздат, 1979.
82. Кирсанов В.В., Суворов А.Л., Трушин Ю.В. Процессы радиационного дефектообразования в металлах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
83. Эдельман В.С. Развитие сканирующей туннельной и силовой микроскопии. // ПТЭ, 1991, № 1, С.24.
84. Свойства углеродных конструкционных материалов. Справочник / Под ред. В.П.Соседова. М.: Металлургия, 1975.
85. Куликов Д.В., Суворов А.Л., Сурис Р.А. и др. Физическая модель формирования периодической структуры на поверхности пиролитического графита при высокоэнергетичной ионной бомбардировке. // Письма в ЖТФ, 1997, Т.23, С.89.
86. Фиалков А.С., Бавер А.И., Сидоров Н.М. Пирографит. Успехи химии, 1965, Т.34, № 1, С.132.
87. Фиалков А.С. Углеграфитовые материалы. М.: Энергия, 1979.
88. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. // Nature, 1991, V.354, P.56.
89. Ebbesen T.W., Ajayan P.M. Large-scale synthesis of carbon nanotube. // Nature, 1992, V.358, P.220.
90. Kroto H.W., Heath J.R., Brien S.C. et. al. C_{60} Buckminsterfullerene. // Nature, 1985, V.318, P.162.
91. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода. // УФН, 1995, Т.165, № 9, С.977.
92. Gulyaev Yu.V., Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Sinitsyn N.I. et. al. Field emitter arrays on nanofilament carbon structure films // 7th International Vacuum Microelectronics Conference (IVMC'94), July 4-7, 1994, Grenoble, France. Revue "Le Vide, les Couches Minces" – Supplement au N 271, Mars-Avril 1994, P.322.
93. De Heer W.A.,Chatelain A., Ugarte D. A carbon nanotube field-emission electron source. // Science, 1995, V.270, P.1179.
94. Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Gulyaev Yu.V., Sinitsyn N.I. et. al. Influence of external factors on electron field emission from thin-film nanofilament carbon structures. // J. Vac. Sci. Technol., 1996, V.B14, N 3, P.2080.
95. Айбунд М.Р., Поленов Б.В. Вторично-электронные умножители открытого типа и их применение. М.: Энергоиздат, 1981.