

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Катодолуминесцентные источники света
(современное состояние и перспективы)**

А.С. Бугаев, В.Б. Киреев, Е.П. Шешин, А.Ю. Колодяжный

Реальной альтернативой существующим энергосберегающим источникам света могут стать экологически безопасные энергосберегающие катодолуминесцентные источники света (КИС) нового поколения, основанные на свечении люминофора под действием электронов, полученных при автоэлектронной эмиссии с автокатода. В настоящее время не существует разработанных оптимизированных конструкций ламп общего назначения с автоэлектронным катодом. Поэтому первоочередной задачей является разработка прототипа высокоэффективного КИС с низкой себестоимостью при массовом производстве.

Ключевые слова: автоэмиссия, автоэмиссионные свойства материалов, автоэлектронные катоды, углерод, углеродные волокна, катодолуминесценция, источники света, эффективность источников света

PACS numbers: 42.72.Bj, 85.60.Jb, 88.05.Tg

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201508e.0853

Содержание

1. Введение (853).
 2. Принцип действия катодолуминесцентных источников света (854).
 3. Эффективность источников света общего назначения (854).
3.1. Физическая и экономическая эффективность светотехнических приборов и устройств. 3.2. Оценки экономической эффективности источников света общего назначения. 3.3. Перспективы оптимизации конструкции катодных люминесцентных ламп — источников света общего назначения.
 4. Источники света с термокатадами (861).
 5. Источники света с автокатадами (861).
5.1. Пальчиковые источники света. 5.2. Плоские источники света. 5.3. Цилиндрические источники света. 5.4. Сферические и квазисферические источники света.
 6. Особенности источников питания для автоэмиссионных источников света (874).
 7. Специальные катодолуминесцентные источники света (876).
7.1. Цветные источники света. 7.2. Ультрафиолетовые лампы.
 8. Заключение (880).
- Список литературы (881).

1. Введение

Одной из основных задач в настоящее время является разработка и широкое применение энергосберегающих и, что не менее важно, долговечных и экологически чистых источников света. К данному моменту разработано большое количество различных источников света. Но основной вопрос — создание источника света общего назначения (в квартире, офисе и т.п.) — пока не решён. Наиболее часто используемые в офисах лампы "дневного света" и приобретающие популярность лампы на светодиодах имеют ряд особенностей, неблагоприятно влияющих на зрение и общее самочувствие человека.

В настоящее время происходит активная замена ламп накаливания энергосберегающими лампами. Лампы накаливания обладают несомненными достоинствами (привычный для глаз спектр излучения, простота в эксплуатации), но в то же время они имеют и большие недостатки, а именно очень малый коэффициент полезного действия и небольшой срок службы. Энергосберегающие и люминесцентные лампы имеют высокую эффективность и продолжительный срок службы. Однако и им свойственны существенные недостатки: спектр излучения линейчатый, они содержат пары ртути, при включении мигают, а на полную яркость выходят за несколько минут. Для производства светодиодных источников света требуется применение весьма сложных и дорогих технологий, а также сверхчистых материалов, иногда крайне ядовитых, таких как мышьяк. Ряд материалов для полупроводниковых технологий имеет ограниченное распространение в природе, например индий.

Таким образом, существует потребность в источниках света, которые лишены перечисленных недостатков и в то же время имеют высокую световую эффективность, большой срок службы и являются максимально экологичными.

А.С. Бугаев, В.Б. Киреев, Е.П. Шешин, А.Ю. Колодяжный.
Московский физико-технический институт
(государственный университет),
Институтский пер. 9, 141700 г. Долгопрудный, Московская обл.,
Российская Федерация
E-mail: bugaev@cplire.ru, kireevvikt@yandex.ru,
sheshin.ep@mipt.ru, kolodyazhnyj@gmail.com

Статья поступила 24 февраля 2015 г.,
после доработки 12 мая 2015 г.

гически безопасными как в производстве и эксплуатации, так и при их утилизации, что предполагает отсутствие в конструкции и при производстве таких источников света вредных веществ.

2. Принцип действия катодолюминесцентных источников света

Принцип действия электролюминесцентного источника света с автоэлектронным катодом — это возбуждение свечения люминофора под действием электронной бомбардировки. Поскольку источники света должны обладать определёнными свойствами, приведём некоторые основополагающие понятия, принятые в светотехнике [1], для устранения разночтения данных отдельных авторов.

Варианты конструкций источников света можно разделить на два основных класса (рис. 1) [2] по принципу их работы: *на просвет* или *на отражение*. Основная, классическая, конструкция в принципе напоминает обычный автоэлектронный микроскоп. Она содержит (рис. 1а) автоэлектронный катод стержневого типа 1. Таким катодом может быть любая конфигурация: стержень из графита, пучок углеродных волокон или наноструктуры на торце соответствующего стержня. Для вытягивания электронов используется металлическая диафрагма. Конфигурация катодно-модуляторного узла подбирается так, чтобы оптимизировать сочетание трёх взаимоисключающих факторов: максимального токопрохождения через модулятор; минимального управляющего напряжения и максимальной равномерности потока электронов по поверхности экрана.

Наиболее просто последняя задача решается перекрытием автоэлектронных потоков от достаточно большого количества центров эмиссии. Этого можно достичь использованием нескольких стержневых автокатодов и соответственно модуляторных отверстий, которые располагаются равномерно по окружности для получения источника света круглого сечения.

В таких "классических" источниках света яркость люминофора используется не в полной мере (30 %) из-за того, что часть фотонов летит назад в колбу. Большую яркость можно получить, если поменять местами люминофор и проводящее покрытие, причём в качестве последнего использовать алюминий (рис. 1б). Алюминиро-

ванное покрытие позволяет увеличить яркость до 70 % и более от максимально возможной.

Наилучшие результаты по увеличению коэффициента полезного действия (КПД) можно получить для источника света на отражение [3] (рис. 1в). В этом случае электроны 3 движутся к люминесцентному слою 4, который нанесён на алюминиевое зеркало 8. Потери света определяются только незначительным (несколько процентов) его поглощением в выходном стекле 6 и степенью прозрачности катодной матрицы 10. Потери в последней могут быть снижены до величины менее 10 %.

В зависимости от конкретных технологических требований практического применения может быть использован один из указанных принципов или их модификация.

В разделах 3–7 рассмотрены факторы, определяющие эффективность катодолюминесцентных источников света, и различные варианты конструкций, направленных на её повышение.

3. Эффективность источников света общего назначения

3.1. Физическая и экономическая эффективность светотехнических приборов и устройств

В целом, перед разработчиками источников света общего назначения стоит проблема достижения компромисса между такими характеристиками, как световой поток, световая отдача, срок службы изделия, себестоимость, простота и экологичность производства и эксплуатации, спектральные параметры излучения (включая индекс цветопередачи), стабильность работы и неизменность свойств источника света во времени, возможность использования существующей светотехнической арматуры и взаимозаменяемость в ней источников света различного типа.

Эта задача является частным случаем проблемы сравнительной оценки эффективности для многих типов товаров, требующих систематических эксплуатационных расходов. Такая проблема актуальна для электротехнических и светотехнических приборов, а также предназначенных для удовлетворения типовых потребностей устройств, например: источников света с заданными светотехническими характеристиками; холодильных установок, обеспечивающих охлаждение с определёнными термодинамическими параметрами; электрических аккумуляторов, дающих заданное напряжение питания и силу тока и т.д. — использование которых требует дополнительных, прежде всего энергетических, затрат в ходе их эксплуатации и утилизации после окончания их срока службы. Задача такой сравнительной оценки несколько облегчается, когда функциональные свойства могут быть чётко отделены от эстетических и других, в том числе чисто субъективных, потребительских характеристик (размер, форма, цвет, другие элементы дизайна и т.п.).

Понятие эффективности применительно к светотехническим устройствам обычно сводится к понятию энергетической эффективности, или светоотдачи, которая определяется как отношение величины интенсивности стационарного светового потока источника видимого излучения, измеренного в люменах, к величине подводимой к этому источнику электрической мощно-

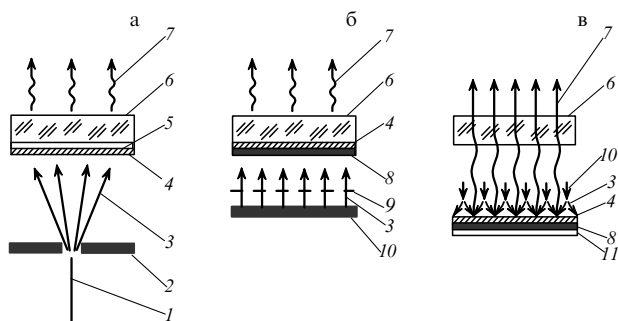


Рис. 1. Принципы конструкций источников света: (а, б) на просвет, (в) на отражение. 1 — стержневой автокатод, 2 — модулятор, 3 — поток электронов, 4 — люминофор, 5 — прозрачное проводящее покрытие, 6 — выходное стекло, 7 — видимый свет, 8 — алюминиевое покрытие, 9 — сетка, 10 — катодная матрица, 11 — подложка.

сти, измеряемой в ваттах. Этот упрощённый подход к оценке эффективности не учитывает всего полезного эффекта (полного светового потока, сгенерированного за всё время эксплуатации источника света), полученного от соответствующего устройства, а также суммарных энергетических издержек полного цикла производства, эксплуатации и утилизации отслужившего свой срок изделия (суммарные энергетические затраты, связанные с использованием соответствующего источника света). Именно отношение двух указанных величин могло бы служить более корректной физической характеристикой эффективности светотехнического устройства. Однако для реализации расчёта такой физической эффективности требуется проведение оценки суммарных прямых и косвенных энергетических издержек производства, эксплуатации и утилизации соответствующих устройств, что не всегда возможно.

С точки зрения экономического подхода к оценке эффективности, следует оценивать отношение суммарного полезного эффекта к общим денежным затратам. Необходимо отметить, что между физическими (энергетическими) и экономическими (денежными) характеристиками эффективности имеются глубокие аналогии, обусловленные связью между денежной ценой товара и свободно энергетической (экологической) ценой полного цикла его производства, эксплуатации и утилизации (см., например, обсуждение этого вопроса в работах [4, 5]).

Отметим также, что эффективность любого товара, в том числе любого физического прибора, должна определяться с точки зрения либо его потребителя, либо общества в целом. Эти подходы являются эквивалентными только тогда, когда с помощью правовых и организационных решений все издержки, связанные с использованием оцениваемого товара (введением в эксплуатацию, самой эксплуатацией и утилизацией товара, отслужившего свой срок), отнесены к издержкам потребителя. То есть все внешние эффекты (экстерналии), к которым прежде всего относятся экологические издержки третьих лиц, связанные с данным товаром, полностью интернализированы (в данном случае отнесены к издержкам потребителя).

Например, для экологически опасных газоразрядных ртутных ламп механизмом осуществления такой интернализации может стать обязательная оплата потребителем расходов на утилизацию и взимание с него средних рискованных платежей за экологический ущерб, наносимый окружающей среде при возникновении нештатных ситуаций. Оптимальным механизмом, обеспечивающим такую оплату, по нашему мнению, было бы введение взимаемой при покупке опасной лампы (а также других экологически опасных товаров) залоговой стоимости, включающей в себя как затраты на штатную утилизацию отслужившего свой срок изделия, так и усреднённые рискованные затраты, связанные с необходимостью ликвидации последствий утраты изделия (например, утечки ртути из разбитой лампы) во время его эксплуатации или нештатной утилизации. В этом случае залоговая стоимость возвращается владельцу за вычетом стандартных расходов на утилизацию после сдачи лампы на предприятие по утилизации. Отметим также, что необходим учёт того, что расходы на покупку, эксплуатацию и утилизацию изделий распределены во времени. Следовательно, все понесённые расходы должны быть приведены, согласно стандартной экономической теории и

практике, к одному времени, например к времени начала эксплуатации соответствующего изделия, с помощью стандартного метода дисконтирования, принятого, в частности, при оценке инвестиционных проектов [6, 7].

Для решения проблемы сравнительной оценки функциональной эффективности товара может быть предложен следующий общий алгоритмизированный модельный подход.

1. Формулируется количественный критерий удовлетворяемой потребности (например, интенсивность светового потока, умноженная на время (количество часов) работы, для источника света, обеспечиваемый теплоотвод за время функционирования для холодильных установок, произведённая работа для аккумуляторов и т.д.).

2. Формируется конкретная частная модель для оценки (и соответственно, проводится сама оценка) установочных расходов на приобретение и введение в эксплуатацию соответствующего товара (устройства). Для источника света это могут быть не только расходы на покупку (производство, доставку, продажу) отдельной лампы, что верно с точки зрения конкретного индивидуального потребителя, но и расходы с точки зрения инвестора или собственника на установку отдельного источника света с учётом затрат на закупку и установку соответствующей осветительной арматуры, стационарных драйверов (или отдельно устанавливаемых пускателей), подвод определённой электрической мощности к объекту освещения в целом в пересчёте на отдельную осветительную точку.

3. Создаётся конкретная модель для проведения оценки учёта экологических издержек, связанных с производством, эксплуатацией и утилизацией соответствующих товаров. При введении залоговой стоимости экологические издержки с учётом всех рисков автоматически входят в установочную стоимость, а возврат части залоговой стоимости после окончания срока службы лампы должен быть учтён после дисконтирования со знаком минус в суммарных издержках, приведённых к моменту начала эксплуатации источника света.

4. Формируется модель оценки распределённых во времени издержек для расчёта эксплуатационных расходов, приведённых к моменту начала эксплуатации (моменту приобретения или установки) источника света с учётом:

- режима эксплуатации (например, при ресурсе работы 50000 ч источник света используется в течение строго определённого периода суток и срок его эксплуатации составляет 20 лет (более 175000 ч));
- распределения эксплуатационных расходов по времени (например, равномерные по времени ежемесячные платежи за потреблённую электроэнергию с учётом изменений во время срока службы лампы тарифа оплаты электроэнергии).

5. Все издержки с учётом дисконтирования суммируются, и их сумма даёт общие дисконтированные издержки, необходимые для получения соответствующего потребительского эффекта, в частности, для источника света — интегрального светового потока размерностью [лм час].

Реализовать этот алгоритм для расчёта необходимых издержек в единицах энергии часто оказывается затруднительным, хотя расчёт именно физической (энергетической) эффективности в соответствии с вышеизложенным

алгоритмом, по нашему мнению, является наиболее адекватным для оценки и выбора наиболее перспективных источников света общего назначения.

Указанный алгоритм для расчёта экономической (денежной) эффективности может быть реализован при введении некоторых упрощений, что проиллюстрировано в разделе 3.2. Экономические оценки эффективности источников света и, главное, предлагаемый подход для их количественного определения позволяют также выявлять ключевые физические, производственно-технологические и эксплуатационные ограничения, определяющие перспективность применения существующих источников света общего назначения и разработки новых источников света.

3.2. Оценки экономической эффективности источников света общего назначения

В этом разделе изложен разработанный нами (см., например, [8, 9]) подход к оценке экономической эффективности источников света общего назначения, основанный на сопоставлении потребительского эффекта изделия (для источника света общего назначения — это генерация светового потока заданного спектрального состава в течение определённого периода времени) и дисконтированных к начальному периоду распределённых во времени расходов на его установку, эксплуатацию и утилизацию. Предложенный простой интегральный критерий оценки экономической эффективности источников света E_f (размерностью лм час на денежную единицу) при близких спектральных характеристиках источников и прочих равных условиях имеет вид

$$E_f = \left(\frac{P}{ST} + \frac{P_{el}}{ED} \right)^{-1}, \quad (1)$$

учитывающий

— физико-технические параметры самого источника света:

- S — световой поток (суммарная мощность световой энергии, излучаемой источником света) в люменах;

- E — энергетическую эффективность, или световую отдачу (отношение светового потока к мощности подводимой к источнику света электрической энергии), измеряемую в единицах лм Вт⁻¹;

- T — ресурс работы в часах;

- P — производственные и экологические характеристики: затраты на производство и последующую утилизацию в денежных единицах (установочная стоимость источника света с учётом экологических издержек как на его производство, так и эксплуатацию и утилизацию, приведённых к периоду начала эксплуатации);

— характеристики эксплуатации источника света и изменения экономической конъюнктуры, а также ожидания потребителя во времени:

- P_{el} — цену электроэнергии в денежных единицах на 1 Вт час на момент установки;

- $1/D$ — коэффициент дисконтирования — единый показатель, отражающий динамику изменения цены электроэнергии, динамику её потребления (режимы работы источника света во времени в период его использования) с учётом динамики изменения интегральных экономических характеристик и психологических аспектов ожиданий потребителя по распределению платежей во времени. Коэффициент дисконтирования характеризует

приведение эксплуатационных затрат, распределённых во времени с учётом ожиданий потребителя и рисков, к моменту установки источника света. Заметим, что фактор D зависит от ресурса работы источника света T и режима его эксплуатации (периода времени, в течение которого вырабатывается ресурс, — причём, при прочих равных условиях, чем реже источник света используется, тем больше период выработки его ресурса), возрастая с увеличением ресурса работы изделия и периода его выработки в определённом режиме.

При различных предположениях относительно экономической конъюнктуры, психологии потребителя, динамики распределения и общего периода платежей, а также времени эксплуатации источника света параметр D может варьироваться в широких пределах (ориентировочно наиболее вероятный диапазон его значений от 2 до 10).

Ниже приведём оценки эффективности для различных источников света при следующих предположениях:

- тарифы на потребление электрической энергии неизменны во времени;

- потребление электроэнергии источником света равномерно распределено во времени (таким образом, что источник света с ресурсом работы 50000 ч имеет срок эксплуатации 20 лет);

- ежемесячная норма дисконтирования равна 0,01 (12 % в год).

Приведём выражение (1) к безразмерному виду, используя сделанные предположения и безразмерные параметры t, k, n, p , такие, что

$$T = 10^4 t, \quad (2)$$

$$T_e = 48 t, \quad (3)$$

где ресурс работы T измеряется в часах, срок эксплуатации T_e — в месяцах, а коэффициент t для известных источников света изменяется в диапазоне от 0,1 до 5 (здесь мы принимаем, что источник света с ресурсом работы 10000 ч эксплуатируется 48 мес., т.е. четыре года),

$$E = 10^2 k, \quad (4)$$

где E измеряется в лм Вт⁻¹, а k для известных источников света лежит в диапазоне от 0,12 до 1,

$$P_{el} = 10^{-3} n, \quad (5)$$

где цена электроэнергии P_{el} измеряется в рублях на 1 Вт час, $n = 2-4$,

$$P = 10^2 p, \quad (6)$$

где P — цена источника света для потребителя в рублях, а p изменяется от 0,07 до 10 и выше.

При принятых предположениях эффективность источника света со световым потоком 1000 лм определяется следующим выражением (в клм час на 1 руб.):

$$E_f = 10^2 \left(\frac{p}{t} + \frac{n}{kD(t)} \right)^{-1}. \quad (7)$$

В формуле (7) отражён и тот факт, что параметр D однозначно зависит от параметра t в рамках принятых предположений, $D = D(t)$.

Таблица 1. Эффективность существующих и перспективных источников света различного типа со световым потоком 1000 лм в зависимости от их технико-экономических характеристик и режимов эксплуатации при тарифе на электроэнергию 3 руб. на 1 кВт час (параметр $n = 3$)

Тип источника света	Ресурс эксплуатации, ч $T = 10^4 t$	Длительность эксплуатации, мес. $T_e = 48 t$	Расчётный параметр дисконта $D(t)$	Световая отдача, лм Вт ⁻¹ $E = 10^2 k$	Цена источника света, руб. $P = 10^2 p$	Эффективность источника света Ef, клм час на 1 руб.
Лампа накаливания	1000 $t = 0,1$	4,8 $t = 0,1$	1	12 $k = 0,12$	7 $p = 0,07$	≈ 4
Галогенная лампа	4000 $t = 0,4$	19,2 $t = 0,4$	1,1	28 $k = 0,28$	400 $p = 4$	≈ 5
Металло-галогенные (металло-галогидные) лампы	4000 $t = 0,4$	19,2 $t = 0,4$	1,1	73 $k = 0,73$	400 $p = 4$	$\approx 7,3$
Компактная люминесцентная лампа*	10000 $t = 1$	48 $t = 1$	1,26	50 $k = 0,5$	150 $p = 1,5$	≈ 16
Люминесцентная лампа*	10000 $t = 1$	48 $t = 1$	1,26	90 $k = 0,9$	150 $p = 1,5$	≈ 22
Светодиодный источник света	30000 $t = 3$	144 $t = 3$	1,9	70 $k = 0,7$	200 $p = 2$	≈ 34
Светодиодный источник света**	50000 $t = 5$	240 $t = 1$	2,64	70 $k = 0,7$	200 $p = 2$	≈ 49
Светодиодный источник света**	50000 $t = 5$	240 $t = 1$	2,64	100 $k = 1$	300 $p = 3$	$\approx 57,6$
Светодиодный источник света**	50000 $t = 5$	240 $t = 1$	2,64	100 $k = 1$	250 $p = 2,5$	≈ 61
Автокатодная люминесцентная лампа (АКЛЛ)**	50000 $t = 5$	240 $t = 1$	2,64	35 $k = 0,35$	30 $p = 0,3$	≈ 30
АКЛЛ**	50000 $t = 5$	240 $t = 1$	2,64	50 $k = 0,5$	100 $p = 1$	≈ 40
АКЛЛ**	50000 $t = 5$	240 $t = 1$	2,64	50 $k = 0,5$	50 $p = 0,5$	≈ 43
АКЛЛ**	50000 $t = 5$	240 $t = 1$	2,64	70 $k = 0,7$	100 $p = 1$	≈ 55
АКЛЛ**	50000 $t = 5$	240 $t = 1$	2,64	70 $k = 0,7$	30 $p = 0,3$	≈ 59

* Цена ламп без учёта расходов на утилизацию этих источников света, содержащих ртуть.
 ** Перспективные источники света с ожидаемыми технико-экономическими характеристиками.

В таблице 1 представлены значения эффективности источников света различного типа при соответствующих технико-экономических характеристиках и предположениях относительно режимов их эксплуатации.

Проведённые по формуле (7) оценки эффективности показывают, что реальной альтернативой существующим энергосберегающим источникам света и перспективным разработкам на основе светодиодов могут стать экологически безопасные энергосберегающие автокатодные люминесцентные лампы (АКЛЛ) нового поколения, основанные на свечении люминофора под действием электронов, полученных при автоэлектронной эмиссии из катода, изготовленного из наноструктурированного углеродного материала.

Из приведённых в табл. 1 оценок видно, что в настоящее время вполне конкурентоспособными с существующими являются перспективные источники света с эффективностью

$$Ef \approx 20 - 30 \text{ клм час на 1 руб.}$$

Из ныне существующих источников света с налаженным массовым производством наиболее эффективными являются газоразрядные люминесцентные и светодиодные, а среди перспективных источников света — светодиодные и автокатодные люминесцентные лампы, причём сегодня для первых лимитирующим фактором, определяющим их эффективность, является цена производства, а для вторых — достижение высокой световой отдачи с учётом того, что для АКЛЛ, как видно из оценок, приведённых в табл. 1, эффективность малочувствительна к цене отдельного изделия в диапазоне ожидаемых технико-экономических характеристик.

3.3. Перспективы оптимизации конструкции катодных люминесцентных ламп — источников света общего назначения

Приведённые в разделе 3.2 оценки эффективности показывают, что перспективность использования тех или иных источников света различных типов будет определяться не только экономической конъюнктурой и режимом их эксплуатации, влияющими на фактор $D = D(t)$

и параметр n , но и физико-техническими и производственно-технологическими факторами, определяющими такие безразмерные параметры, как t , k и p .

Физические процессы в полупроводниках, приводящие к излучению света, в том числе к генерации лазерного излучения, под действием электронного пучка, рассмотрены, например, в работе [10]. Некоторые аналогичные процессы реализуются при генерации света и в катодолуминофоре при работе катодолуминесцентных ламп (КЛЛ), в значительной степени определяя их эффективность.

Одним из важнейших параметров КЛЛ является светоотдача, а значит, и величина параметра k . Светоотдача КЛЛ определяется следующими процессами и их характеристиками:

- преобразованием электричества от стандартной сети (напряжение 220 В) в источнике питания-преобразователе КЛЛ — КПД источника питания-преобразователя;

- преодолением потенциального барьера на границе раздела материал катода — вакуум, требующим энергозатрат, равных произведению работы выхода электрона на величину тока эмиссии;

- ускорением эмитированных из катода электронов в катодо-модулирующем устройстве и фокусировкой пучка электронов на аноде и покрывающем его слое люминофора. Потери при этих процессах связаны с тем, что часть электронного пучка не попадает на катодолуминофор;

- коэффициентом полезного действия генерации вторичных электронов в катодолуминофоре, определяемым потерями энергии электронного пучка при прохождении анода и слоя люминофора, обусловленными генерацией, рассеянием и поглощением вторичных электронов в слое люминофора;

- КПД генерации света в катодолуминофоре;

- поглощением люминесценции в конструктивных элементах лампы, что влечёт за собой уменьшение светового потока.

Именно выбор материалов катода, анода и люминофоров, их структуры, конструкций и режимов генерации электронного пучка для КЛЛ, ускоряющего напряжения и временных характеристик этого напряжения, способов фокусировки и конструктивных решений, обеспечивающих фокусировку электронного пучка на катодолуминофоре, толщины, структуры и других характеристик слоя катодолуминофора и определяет эффективность всех перечисленных выше процессов и тем самым интегральную характеристику, такую как светоотдача.

При подсчёте светоотдачи необходимо также учесть коэффициент перевода энергетических единиц в светотехнические (т.е. пересчёт интенсивности светового излучения, измеренной в ваттах, в интенсивность излучения, измеряемую в люменах). В максимуме спектральной кривой видности для дневного зрения (относительная спектральная эффективность излучения для стандартного фотометрического наблюдателя, согласно МКО (Международная комиссия по освещению), для дневного зрения (зелёный свет с длиной волны 555 нм)) этот коэффициент равен 683 лм Вт^{-1} . С учётом необходимости обеспечить спектр излучения источников видимого света, соответствующий комфортному восприятию освещения глазом человека, в зависимости от реального спектра излучения лампы этот коэффициент интег-

рально может быть значительно меньше — в 1,5–2 раза (и даже более чем в три раза, например, для света с длиной волны менее 500 нм), — чем величина, соответствующая зелёному свету.

В целом, световой поток выражается как

$$S = 683 \int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (8)$$

где $\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \Phi_e(\lambda, d\lambda)/d\lambda$ — спектральная плотность потока светового излучения в энергетических единицах, $V(\lambda)$ — кривая относительной световой эффективности для стандартного фотометрического наблюдателя МКО (видимый свет), максимум которой $V(\lambda) = 1$ соответствует длине волны 555 нм.

Соответственно, для световой отдачи E справедливо выражение

$$\begin{aligned} E = \frac{S}{W} &= \alpha \frac{683 \int_{380}^{780} \Phi_{\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\Phi_{\Sigma hv}} \frac{\Phi_{\Sigma hv}}{W_{ee}} \frac{W_{ee}}{W_e} \frac{W_e}{W_1} \frac{W_1}{W} = \\ &= \alpha \frac{683 \int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} k_4 k_3 k_2 k_1 = 683 \alpha k_5 k_4 k_3 k_2 k_1, \end{aligned} \quad (9)$$

где α — доля излучённого люминофором света, идущая на освещение, т.е. часть излучённого люминофором света за вычетом потерь, обусловленных поглощением света конструктивными элементами лампы;

W — мощность, подводимая к лампе;

W_1 — мощность, подаваемая на систему генерации электронов (на выходе источника питания-преобразователя, т.е. мощность, потребляемая непосредственно лампой, точнее её катодо-модуляторным узлом);

$k_1 = W_1/W$ — КПД источника питания-преобразователя;

W_e — мощность электронного пучка катод — анод;

$k_2 = W_e/W_1$ — КПД генерации электронного пучка (в случае источника света с термокатодом существенные потери, снижающие этот КПД, обусловлены затратами энергии на нагрев катода);

W_{ee} — мощность генерации возбуждённых электронных состояний (вторичных возбуждённых электронов) в слое люминофора (катодолуминофора);

$k_3 = W_{ee}/W_e$ — КПД генерации возбуждённых электронных состояний катодолуминофора электронным пучком;

$\Phi_{\Sigma hv}$ — суммарная мощность катодолуминесценции,

$$\Phi_{\Sigma hv} = \int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda = \langle hv \rangle I_{hv}, \quad (10)$$

в единицах энергии в диапазоне видимого света (380–780 нм, что соответствует рекомендациям Международного светотехнического словаря по усреднению границ верхнего и нижнего диапазона видимого света (см. справочник [1]));

$\langle hv \rangle$ — средняя энергия кванта видимого излучения;

I_{hv} — интенсивность видимого излучения, измеренная в квантах излучения в единицу времени;

$k_4 = \Phi_{\Sigma hv}/W_{ee}$ — КПД генерации люминесценции по отношению к энергии возбуждённых электронных состояний люминофора;

k_5 — коэффициент пересчёта энергии светового излучения люминесценции в интенсивность светового по-

тока в светотехнических единицах, зависящий только от спектральных характеристик источника излучения,

$$k_5 = \frac{\int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\Phi_{\Sigma hv}}. \quad (11)$$

Для источников света разного типа, но с одинаковыми спектральными характеристиками k_5 имеет одну и ту же величину.

Таким образом, величина светоотдачи в (9), в соответствии с выражениями (10), (11) и принятыми выше обозначениями, определяется произведением следующих коэффициентов: α , k_5 , k_4 , k_3 , k_2 , k_1 , каждый из которых имеет значение меньше единицы и характеризует снижение светоотдачи, связанное с соответствующим этапом преобразования энергии, подводимой к источнику излучения, в световой поток излучения источника в видимом спектральном диапазоне:

$$E = \frac{S}{W} = \alpha \frac{683 \int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} k_4 k_3 k_2 k_1 = 683 \alpha k_5 k_4 k_3 k_2 k_1. \quad (12)$$

Коэффициенты снижения светоотдачи перечисленных выше этапов преобразования можно оценить следующим образом.

1. Коэффициент α — коэффициент потерь при выходе излучения из лампы — определяется исключительно конструктивными особенностями источника излучения и может изменяться от 0,3 до 0,9, в идеальном случае приближаясь к единице.

2. Коэффициент k_5 — коэффициент, определяемый выбором спектра излучения источника света, имеет, как правило, величину порядка 0,2–0,5, но может отклоняться от указанного диапазона, принимая значения менее 0,2 (например, для излучения в коротковолновой (с длиной волны менее 490 нм) или в длинноволновой (с длиной волны более 635 нм) областях спектра видимого света) и более 0,5 (для лампы со спектром излучения в диапазоне длин волн 510–610 нм). Коэффициент k_5 зависит исключительно от спектра излучения источника света и имеет одинаковую величину для источников излучения различного типа с совпадающими спектральными характеристиками. Для оценки можно принять среднее значение k_5 равным 0,3–0,4.

3. Коэффициент k_4 — КПД генерации люминесценции по отношению к генерации возбуждённых электронных состояний люминофора определяется физическими процессами преобразования возбуждённых электронных состояний люминофора в световое излучение заданного спектрального состава. Для применяемых в настоящее время на практике катодоллюминофоров k_4 достигает величины 0,2–0,25 [11–14]. Действительно, поскольку основой катодоллюминофоров являются полупроводники или диэлектрики, в результате многократного рассеяния быстрых электронов пучка, генерированного в катодоллюминесцентном источнике света, с энергиями в несколько кэВ и поглощения их энергии материалом катодоллюминофора образуется большое число возбуждённых состояний — электронно-дырочных пар, которые рассеивают свою избыточную энергию вплоть до величины энергии электронно-дырочной пары, равной ширины запрещённой зоны (процесс термализации). Далее

происходят возможные процессы безызлучательной дезактивации электронно-дырочных пар или их захват центрами свечения, сопровождающийся стоксовыми потерями, с дальнейшим излучением кванта света с энергией, меньшей, чем ширина запрещённой зоны. Таким образом, каждое возбуждённое состояние катодоллюминофора (без учёта возможной в принципе при определённых условиях каскадной люминесценции [15, 16]) может дать не более одного кванта света. Следовательно, для k_4 справедливо соотношение

$$k_4 = \frac{\Phi_{\Sigma hv}}{W_{ee}} = \frac{\langle hv \rangle I_{hv}}{\gamma E_G N_{ee}} = \frac{\langle hv \rangle}{\gamma E_G} \frac{I_{hv}}{N_{ee}}, \quad (13)$$

где, как и ранее,

$\langle hv \rangle$ — средняя энергия кванта видимого излучения;

I_{hv} — интенсивность видимого излучения, измеренная в квантах излучения в единицу времени;

$\Phi_{\Sigma hv} = \langle hv \rangle I_{hv}$ — интенсивность светового потока в энергетических единицах;

$W_{ee} = \gamma E_G N_{ee}$ — мощность генерации возбуждённых электронных состояний (вторичных возбуждённых электронов или, на языке зонной теории, возбуждённых электронно-дырочных пар) в слое люминофора (катодоллюминофора);

N_{ee} — интенсивность генерации возбуждённых электронных состояний (вторичных возбуждённых электронов (электронно-дырочных пар)) в слое люминофора (катодоллюминофора);

γE_G — средняя энергия генерированного возбуждённого состояния катодоллюминофора (возбуждённой электронно-дырочной пары, образующейся при рассеянии быстрых электронов в материале люминофора);

$\langle hv \rangle / (\gamma E_G)$ — КПД превращения возбуждённого электронного состояния (возбуждённой электронно-дырочной пары) в энергию кванта света;

I_{hv} / N_{ee} — квантовый выход люминесценции по отношению к генерированным возбуждённым электронным состояниям (возбуждённым электронно-дырочным парам) в материале катодоллюминофора;

E_G — ширина запрещённой зоны материала катодоллюминофора;

γ — коэффициент, характеризующий потери энергии в процессе термализации, т.е. превышение энергией первоначально возбуждённого состояния электронно-дырочной пары ширины запрещённой зоны. Исходя из экспериментальных данных обычно принимается значение $\gamma = 3$ [17].

Аналогичная оценка также следует из теоретического рассмотрения для прямозонных полупроводников, проведённого в [11], где эффективные массы электрона и дырки принимались приблизительно равными между собой. Отсюда следует, что величина $\langle hv \rangle / (\gamma E_G)$ не может превышать 0,33. С учётом наличия стоксовых потерь и того факта, что квантовый выход люминесценции менее единицы, k_4 составит величину 0,25–0,30. Следует отметить, что эта оценка не является окончательной, так как имеются данные о том, что в широкозонных диэлектриках ($E_G > 6–8$ эВ) коэффициент γ равняется 2 [15, 16]. Этот факт, казалось бы, позволяет считать, что величина $\langle hv \rangle / (\gamma E_G)$ может достичь значения 0,5. Однако последнее справедливо только при генерации квантов света с энергией 6–8 эВ, которая не соответствует энергии квантов света видимого диапа-

зона, а значит, при рождении одного фотона в режиме одноквантовой катодоллюминесценции, когда на каждую возбуждённую электронно-дырочную пару генерируется не более одного фотона (в видимом диапазоне с энергией 2–3 эВ), эта величина снижается до 0,1–0,25. Необходимо также учитывать принципиальную возможность повышения КПД превращения возбуждённого электронного состояния (возбуждённой электронно-дырочной пары) в энергию кванта света при реализации механизмов многоквантовой (каскадной) люминесценции.

В процессах антистоксовой люминесценции [18], точнее в их разновидностях, ступенчатом и кооперативном, в том числе сенсибилизированного фотовозбуждения [19–24], энергия квантов длинноволнового (инфракрасного (ИК) или видимого) излучения при поглощении веществом последовательно или кооперативно суммируется, создавая высоковозбуждённое состояние, способное непосредственно или при переносе на центр люминесценции излучать квант света с энергией, превышающей энергию квантов поглощённого длинноволнового излучения. В отличие от этого сущность явления многоквантовой (в частности, каскадной) люминесценции [25–49] состоит в том, что последовательное или кооперативное излучение двух или более квантов инфракрасного или видимого диапазонов происходит за счёт энергии состояния, возбуждённого при поглощении веществом электронного пучка или более коротковолновых фотонов видимого или ультрафиолетового (УФ) диапазонов.

Явление многоквантовой люминесценции, при которой одно высоковозбуждённое состояние или один фотон с высокой энергией генерируют два или более фотонов с меньшей энергией, в последние годы интенсивно исследуется с точки зрения возможности создания каскадных люминофоров, преобразующих УФ-излучение в видимый свет, для использования их в эффективных люминесцентных источниках света, таких как газоразрядные люминесцентные лампы, светодиоды или АКЛЛ, а также в других приложениях [37, 50–52].

Наиболее исследован процесс преобразования кванта ультрафиолетового или коротковолнового видимого излучения в два кванта более длинноволнового излучения (Quantum Cutting (QC) process), который может увеличить эффективность источников света в два и даже более чем в два раза в случае каскадного излучения трёх [47] и более фотонов.

QC-процесс, или каскадная эмиссия, может осуществляться в соответствии по крайней мере с двумя различными механизмами [37]. Согласно первому механизму происходит одновременная передача энергии от донора двум акцепторам с разделением между ними энергии высоковозбуждённого состояния и последующим испусканием двух фотонов, как, например, в случае использования ионов Ln [25]. Примеры реализации первого механизма характерны также для систем Tb:Yb, Bi:Yb, Ce:Yb, Eu²⁺:Yb и др. [28]. Второй механизм каскадной люминесценции также реализуется в системах, содержащих редкоземельные элементы, такие как, например, Pr³⁺ [32]. Каскадная люминесценция, включающая в себя двухступенчатый процесс передачи энергии в системе LiGdF₄:Eu³⁺, описана также в работе [29]: фотон с длиной волны 202 нм, поглощаемый ионами Gd³⁺, передаётся ионам Eu³⁺ с последующим интенсивным излучением в видимом диапазоне. Фотоны с низкой энергией могут быть также получены в процессе передачи

энергии фононами в системах, содержащих примеси Eu:Yb [31].

Хотя основное внимание в большинстве публикаций уделено преобразованию УФ-излучения в видимое излучение, в частности, в процессе многофотонной каскадной фотоллюминесценции, работы последнего времени, например [38], свидетельствуют о возможности каскадной фотоллюминесценции в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах при использовании вакуумного УФ-излучения, а значит, и о возможности получения эффективной многоквантовой катодоллюминесценции.

Таким образом, эксперименты в этом направлении, по нашему мнению, следует всемерно расширять, учитывая принципиальную возможность переноса энергии в катодоллюминесценции [53] и растущее число публикаций, посвящённых исследованию новых материалов, перспективных для использования при создании новых образцов автокатодных люминесцентных источников видимого и ультрафиолетового излучения [54–71].

Учитывая вышесказанное, следует ожидать, что снижение стоковых потерь в широкозонных материалах в результате реализации механизмов каскадной люминесценции позволит при удачном развитии исследований достичь значения КПД катодоллюминесценции 0,3–0,4 [72].

4. Коэффициент k_3 — КПД генерации возбуждённых электронных состояний катодоллюминофора электронным пучком определяется фокусировкой электронного пучка и долей поглощения его энергии в материале катодоллюминофора. Этот коэффициент, который не превышает доли поглощённых в слое катодоллюминофоров электронов, определяется коэффициентом отражения электронного пучка от слоя люминофора и коэффициентом прохождения электронного пучка через этот слой. Величина k_3 существенно зависит от конструктивного решения источника света, в частности от геометрии взаимного расположения катода (катодомодулирующего узла), анода и слоя люминофора (катодоллюминофора), от материала, толщины и структуры слоя люминофора и т.д., и может изменяться в широких пределах, достигая, по нашим оценкам, значения более чем 0,9.

5. Коэффициент k_2 — коэффициент, соответствующий КПД генерации электронного пучка, может достигать для автокатодного источника излучения значения, практически равного единице, однако в случае источника света с термокатодом k_2 может быть заметно меньше единицы, что обусловлено затратами энергии на нагрев катода.

6. Коэффициент k_1 — коэффициент снижения светоотдачи за счёт источника-преобразователя может быть оценён величиной 0,7–0,95.

Таким образом, используя вышеприведённые значения коэффициентов, для светоотдачи катодоллюминесцентных источников излучения в видимом диапазоне света мы получаем оценку 40–80 лм Вт⁻¹. Однако достичь таких значений можно только при оптимальных конструктивных решениях, обеспечивающих высокую эффективность катодоллюминесцентных ламп. На практике получены величины светоотдачи в диапазоне 25–37 лм Вт⁻¹ [73, 74].

Как отмечалось выше, в последнее время увеличилось число работ, посвящённых исследованию новых материалов, перспективных для использования при создании новых образцов автокатодных люминесцентных источ-

ников видимого и ультрафиолетового излучения [54–71]. В частности, в работах [56, 58, 61, 63, 64, 70, 71] рассмотрены новые материалы для автокатодов, в том числе на основе углеродных [56, 64] наноструктур и наноструктур на основе других материалов [58, 61, 63, 70, 71]. В работах [54, 59, 62, 65, 67, 68] рассмотрены возможности использования различных катодолуминофоров, в частности, на основе метаматериалов [54]. Интерес представляют работы по изучению возможности создания ультраминиатюрных и наноразмерных источников катодолуминесценции [60, 67] и приложения эффекта катодолуминесценции для исследования наноструктур [55]. Важным направлением исследований является также выбор оптимальных конструктивных решений, основанный на изучении влияния геометрических и электрических параметров автокатодных люминесцентных ламп на их световые и электронные характеристики, включая создание соответствующих моделей [66].

В разделе 4 рассмотрены предлагаемые конструктивные решения, направленные на повышение эффективности КЛЛ, и достигнутые с их помощью результаты в случаях, когда эти решения были реализованы на практике.

4. Источники света с термокатадами

Термоэмиссионная лампа производства фирмы Vul Corporation обладает по сравнению с автоэмиссионной лампой рядом существенных недостатков, являющихся следствием её конструкции.

Предложенная в [75, 76] система освещения представляет собой катодолуминесцентный светоизлучающий прибор, содержащий (рис. 2):

- корпус с прозрачной поверхностью;
- анод, включающий в себя слой люминофора, расположенный на прозрачной поверхности оболочки, предназначенной для излучения через неё света, и проводящий слой;
- широкоугольную электронную пушку для излучения электронов, которые, по существу, являются несфокусированными, содержащую термокатод и отражающий электрод.

В одном из вариантов термоэмиссионный катод с прямым нагревом имеет нагревательный элемент в форме перевёрнутой буквы U с плоским верхом, на котором крепится плоская подложка. На поверхности подложки,

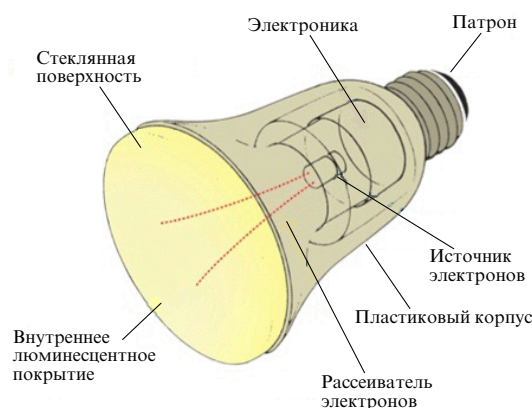


Рис. 2. Конструкция термоэмиссионной лампы Vul.

напротив её крепления к нагревателю, расположен эмиссионный слой.

Альтернативная электронная пушка содержит катод, имеющий нагреватель, приваренный к диску с эмиссионной поверхностью на стороне, обращённой к куполообразной расфокусирующей сетке и аноду.

В [75, 76] также предложен вариант, в котором нагреватель расположен на двух металлических вводах. Пушка тоже имеет металлический вытягивающий диск, находящийся на одном уровне с эмиссионным материалом, выравнивающий поле металлический диск, расположенный на одном уровне с вытягивающим диском, но на несколько большем расстоянии от эмиссионного материала, а также металлическую сетку выпуклой формы и другие части, составляющие электроды пушки.

Использование в качестве источника электронов термокатада приводит к следующим существенным недостаткам:

- снижению эффективности и продолжительности эксплуатации из-за наличия в конструкции греющихся частей;
- проявлению большой инерционности, поскольку для прогрева катода до рабочей температуры требуется определённое время.

Блок питания катодолуминесцентного светоизлучающего устройства содержит два источника питания: один — для обеспечения разности потенциалов между катодом и анодом около 2 кВ и другой — для обеспечения нагрева катода, способный обнаруживать изменения поступающего на вход переменного тока и, постепенно меняя температуру катода, подстраивать яркость света, излучаемого люминесцентным слоем.

Использование низкой разности потенциалов между катодом и анодом приводит к значительному ухудшению эффективности светоизлучающего устройства (заявленная эффективность составляет около 25 лм Вт^{-1}).

С другой стороны, применение сложного источника питания для обеспечения нагрева катода значительно повышает стоимость продукта. По самым скромным подсчётам конечная стоимость рассматриваемой термоэмиссионной лампы в пять раз превышает конечную стоимость автоэмиссионной лампы.

5. Источники света с автокатадами

5.1. Пальчиковые источники света

Пальчиковая катодолуминесцентная лампа благодаря своей конструкции является наиболее ярким источником света. В этой конструкции можно осуществить высоковольтный поток электронов (до 25 кВ) с током до 1 мА. Яркость таких ламп может достигать более чем 100000 кд м^{-2} . Схема конструкции КЛЛ представлена на рис. 3.

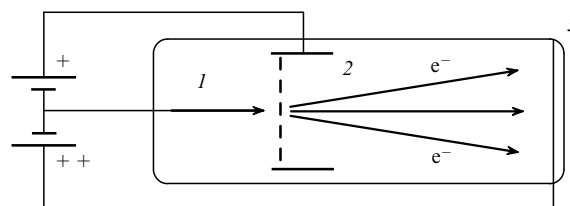


Рис. 3. Схематическая конструкция катодолуминесцентной пальчиковой лампы.

Электроны, эмитированные автокатодом 1, под воздействием суммарного электрического поля управляющего электрода 2 и анода 3 достигают люминесцентного экрана, вызывая его свечение. Ток анода может управляться как напряжением, подаваемым на модулятор (в диапазоне 0,7–5 кВ), так и напряжением, подаваемым на анод (5–25 кВ). Важно, что эти напряжения не представляют опасности для потребителя ввиду малых токов (несколько мкА) и возможности разработки драйвера-источника питания катодолюминесцентного источника света (КИС), размещаемого в цоколях E27/27, E27/30, E27/40.

На сегодняшний день в лабораториях Московского физико-технического института (МФТИ) разработано несколько прототипов КИС с большим сроком службы, часть из которых описана ниже.

Цель изобретения [77] заключалась в повышении экономичности электровакуумного источника света за счёт снижения энергопотребления при одновременном повышении долговечности КИС, а также в результате снижения внутреннего тепловыделения и уменьшения габаритных размеров благодаря большей расходимости электронного пучка.

На экран прибора подаётся напряжение 5–6 кВ, при этом автокатод эмитирует расходящийся пучок электронов с углом при вершине 60° – 90° и током до 400 мкА, величина которого зависит от напряжения на модуляторе.

В качестве катода в изобретении используется автокатод стержневого типа с диаметром стержня 20–300 мкм и плоским эмитирующим торцом. Эмитирующий торец находится в плоскости, обращённой к поверхности модулятора, при этом отношение диаметров отверстия модулятора и торца лежит в пределах от 3:1 до 10:1 для получения наилучших эксплуатационных характеристик, высоких экономичности и эффективности устройства. Расстояние между торцом и экраном составляет 0,5–1,0 диаметра экрана, благодаря чему электронный пучок равномерно возбуждает экран, вызывая его эффективное свечение.

Всё это позволяет в 3–4 раза уменьшить продольные размеры благодаря высокой расходимости пучка электронов, более чем на треть снизить потребляемую мощность, а также повысить долговечность за счёт уменьшения рабочей температуры и числа спаев металла со стеклом.

Для повышения мощности светового излучения в работе [78] был увеличен эмиссионный ток автокатаода. Так как ток с одного пучка углеродных волокон ограничен в случае длительной работы в непрерывном режиме величиной до 400 мкА, увеличение тока предполагает, что автокатод должен содержать несколько пучков углеродных волокон. В рассматриваемой работе автокатод состоит из 5–10 пучков углеродных волокон, расположенных по окружности.

Электроны, попадающие на люминесцентный экран, вызывают его свечение. Высокая равномерность свечения обусловлена эффективным перекрытием изображений отдельных автокатаодов на экране. При этом размеры лампы остаются практически такими же, как и в случае автокатаода из одного волокна. Наличие большого числа пучков волокон в автокатаоде позволяет увеличить эмиссионный ток вплоть до 4 мА. Однако такой большой ток может вызвать перегрев анода.

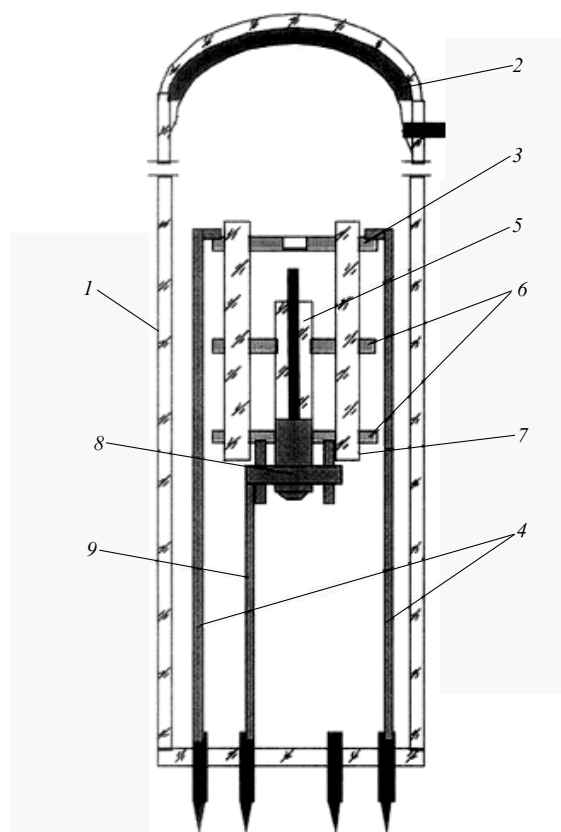


Рис. 4. Автоэмиссионное устройство: 1 — вакуумная колба, 2 — анод, 3 — модулятор, 4 — контактные выводы, 5 — автокатод, 6 — юстировочные диски, 7 — штабики, 8 — контактный узел автокатаода, 9 — контактный вывод автокатаода.

С другой стороны, предложенные в [77] конструктивные решения можно использовать для уменьшения токоотбора с каждого отдельного автокатаода и, соответственно, понижения управляющих напряжений, благодаря чему уменьшившиеся пондеромоторные нагрузки на катод позволяют повысить долговечность автокатаодов и всего прибора в целом.

Разработанная конструкция даёт возможность значительно увеличить силу света (в 1,5–2 раза) и однородность свечения люминесцентного экрана (от 30 %–40 % до 80 %–90 %), в 1,5 раза уменьшить длину прибора и повысить его долговечность.

Таким образом, заявленный КИС (АКЛЛ) имеет повышенную яркость и равномерное свечение, пониженное управляющее напряжение, довольно малые габаритные размеры и большую долговечность.

Автоэмиссионное устройство (рис. 4) [79], которое предназначено для использования в электронно-лучевых приборах с автоэлектронной эмиссией, а именно в зондовых приборах, экранах, растровых электронных микроскопах, может быть также применено в исследовательских и аналитических установках. Это устройство содержит размещённые в вакуумной колбе автокатод, выполненный из пучка углеродных волокон, модулятор с отверстием и контактные выводы. Технический результат заключается в точной фокусировке электронного пучка, что способствует оптимизации параметров и рабочих характеристик электронно-лучевых приборов.

Целью рассматриваемого изобретения является улучшение автоэмиссионных характеристик, в частности по-

вышение срока службы и обеспечение виброустойчивости за счёт обеспечения точной ориентации пучка волокон относительно модулятора и устранения механических нагрузок на волокна.

Реализация конструкции предложенного автоэмиссионного устройства осуществляется следующим образом. Пучок углеродных волокон покрывают оболочкой из диэлектрика, например из стекла, при этом операция "остекловки" позволяет изготавливать катоды с пучком волокон, ориентированным вдоль оси катода и расположенным строго по его центру, при отсутствии механических нагрузок на волокна. Остеклованные и нарезанные на части требуемой длины заготовки освобождают от стеклянной оболочки с обоих концов и на один конец наносят электропроводящее вещество, в частности аквадаг, для увеличения площади контактирующей поверхности, после чего обжимают обечайкой для получения надёжного электрического контакта с катодом и приваривают к обечайке контактный вывод.

Для обеспечения точности центровки катода и установки расстояния от модулятора до катода служат юстировочные диски, которые жёстко связаны с модулятором: центры их отверстий соосны между собой и с отверстием модулятора благодаря использованию изготовленных из стекла штабиков, одновременно присоединённых к пазам юстировочных дисков и модулятора с образованием механического соединения. Автокатод помещают в отверстия юстировочных дисков, жёстко крепят к нижнему диску, затем собранный таким образом катодно-модуляторный узел (КМУ) посредством выводов модулятора устанавливают на монтажном цоколе, подсоединяя контактные выводы автокатода, и проводят герметизацию и вакуумирование колбы. Подготовленное таким образом автоэмиссионное устройство готово к работе.

Работы по оптимизации конструкции КИС (АКЛЛ) активно ведутся в лабораториях МФТИ. Так, задача заявленного в [80] изобретения заключается в упрощении конструкции автоэмиссионного устройства, а следовательно, технологии его изготовления (а значит, и уменьшения его стоимости).

В автоэмиссионном устройстве применяют автокатод, изготовленный из монолитного композиционного материала наноалмаз – углерод с соотношением компонентов 1 : 0,2 – 1 : 0,4. Такой композит получают обработкой заготовки, сформированной из порошка наноалмаза в среде газообразных углеводородов при температуре, превышающей температуру их разложения с образованием углерода. В результате получают объёмный стержень или диск из описанного композита круглого или квадратного сечения, например, с размером сечения 1 – 2 мм и длиной 10 – 15 мм.

Преимуществами заявленного устройства, как показали испытания, являются высокие токи эмиссии, устойчивость при работе в относительно невысоком вакууме ($\sim 10^{-6}$ торр), повторяемость автоэмиссионных характеристик и долговечность автоэмиссионного устройства. Кроме того, эмиттером электронов является не гибкая волокнистая структура, как в приведённом выше техническом решении, требующая остекловывания, а достаточно прочный композит, который легко закрепляется в автоэмиссионном приборе.

В рассмотренных выше образцах и прототипах ламп, которые были разработаны для различных программ,

использовались стандартные телевизионные люминофоры и конструкция ламп не была оптимизирована для источников света общего назначения. В настоящее время, к сожалению, не существует оптимизированных конструкций ламп общего назначения с автоэлектронным катодом ни в нашей стране, ни за рубежом. Поэтому на первом этапе необходимо разработать рабочий прототип высокоэффективного КИС (АКЛЛ) с низкой себестоимостью при массовом производстве.

В настоящее время многие организации таких стран, как США, Великобритания, Южная Корея, Япония и Китай, конкурируют между собой на пути создания энергоэффективных АКЛЛ нового поколения с большим сроком службы. Например, авторами [5] предложено использование катода из углеродных наноструй с целью улучшения характеристик автоэлектронной эмиссии. Конструкция такого светоизлучающего устройства, аналогичная устройству, описанному в работе [81], включает в себя:

- 1) катод из углеродных наноструй, имеющий площадь 1 – 100 мм²;
- 2) управляющий электрод, представляющий собой металлическую сетку площадью 1 – 10 мм²;
- 3) фокусирующую линзу, предназначенную для фокусировки излучаемого света;
- 4) анод, покрытый слоем люминофора.

Стоит отметить, что уровень вакуумирования, необходимый для работы этого светоизлучающего устройства, должен быть менее 10^{-7} торр. В зависимости от требуемой яркости напряжение между катодом и управляющим электродом может составлять от 100 до 1400 В, тогда как к аноду прикладывается напряжение от 1 до 35 кВ.

Авторами [82, 83] представлена концепция автоэмиссионного устройства, включающего в себя герметичный корпус со светопроницаемой частью (одной или двумя противоположными), покрытой слоем люминофора со сформированным на нём светопроницаемым анодом. Напротив светопроницаемого анода расположен катод, представляющий собой слой проводящей суспензии, содержащей наноматериал. С катодом электрически соединён защитный цилиндр, конец которого обращён к светопроницаемому аноду.

Изобретение [84] относится к автоэмиссионному источнику света и методу его изготовления.

Анод содержит прозрачную подложку (выпуклое, вогнутое или плоское прозрачное стекло или прозрачная керамика) и нанесённый на её поверхность проводящий слой оксида индия, легированного оловом (ИТО). Флуоресцентный материал (трёхцветный или цветной люминофор) нанесён на проводящий слой. Катод представляет собой сетку из металла с хорошей проводимостью, поверхность которой покрыта углеродными нанотрубками (однослойными или многослойными) длиной от 1 мкм до ≈ 9 мм. Поперечное сечение сетки имеет дугообразную форму, для того чтобы она могла содержать большее число углеродных нанотрубок. Сетчатая структура катодной пластины способствует такому распределению углеродных нанотрубок, при котором их концы находятся на достаточно большом расстоянии между собой и тем самым уменьшается их экранирование друг другом. Таким образом, по заявлению авторов, значительно увеличивается количество эмиттированных углеродными нанотрубками электронов, что повышает

эффективность излучения и позволяет получить стабильный источник света. Форма анодной и катодной пластин, по существу, одинакова, что может гарантировать постоянное расстояние между ними, чтобы обеспечить равномерность излучения светоизлучающего устройства.

Способ изготовления автоэмиссионного источника света включает в себя следующие стадии:

- 1) изготовление из металлической проволоки сетки катодной пластины;
- 2) осаждение углерода на поверхность катодной пластины;
- 3) подготовка анодной пластины и нанесение на её поверхность флуоресцентного материала;
- 4) сборка катодной и анодной пластин, базы, полупрозрачных панелей в единый автоэмиссионный источник света.

По словам авторов [84], метод производственного процесса является простым и лёгким для внедрения.

Автоэмиссионное устройство, предложенное авторами [85], включает в себя отпаянный корпус со светопроницаемой частью. Слой люминофора и светопроницаемый анод расположены последовательно на внутренней поверхности светопроницаемой части. Катод находится в отпаянном корпусе. Нить углеродных нанотрубок расположена на поверхности катода, обращённой к светопроницаемой части корпуса. Перед помещением в отпаянный корпус нить углеродных нанотрубок проходит следующие стадии: формирование массива углеродных нанотрубок, вытягивание хотя бы одной нити углеродных нанотрубок из этого массива, обработка нити с помощью органического растворителя, при которой формируется пучок из таких нитей, спекание пучков нитей углеродных нанотрубок.

Авторы [86] предложили прототип устройства автоэлектронной эмиссии. Большое внимание авторы уделяют защитному корпусу, который включает в себя периферийную и верхнюю стенки. Периферийная стенка окружает нить из углеродных нанотрубок, в то время как верхняя стенка с отверстием или сеткой выполняет функции электрода.

Яркость свечения такой пиксельной трубки должна быть достаточно высокой и при использовании относительно низкого напряжения. Количество электронов, испускаемых нитью углеродных нанотрубок, можно регулировать посредством изменения напряжения, подаваемого на анод, управляя таким образом яркостью. Кроме того, нить из углеродных нанотрубок, поскольку она окружена защитным корпусом, имеет длительный срок службы и является защищённой от воздействия высокого напряжения.

Из вышеприведённых данных видно, что по своим характеристикам пальчиковые автокатодные люминесцентные лампы (пальчиковые АКЛЛ), особенно после оптимизации их конструкции, могут составить серьёзную конкуренцию как существующим, так и проектируемым перспективным энергосберегающим источникам света, работа которых основана на других физических принципах.

5.2. Плоские источники света

Основной конструктивной особенностью плоских источников света является большая площадь анода (катода) и малое расстояние между катодом и анодом по сравнению с линейными размерами катодной подложки.

При соответствующей технологии производства плоских электровакуумных приборов можно разработать источник света площадью более 500 см^2 . Прибор с такой площадью можно реализовать, используя различные конструкции [87, 88], что определяет конечные характеристики прибора.

Для изготовления автокатодов для плоских приборов могут быть применены различные методы, например трафаретная печать или электрофоретическое осаждение. В качестве наносимого материала целесообразно использовать углеродные порошки, полученные с помощью различных технологий [89]. Кроме того, могут быть применены механические способы обработки массивной углеродной заготовки для создания плоского автоэмиссионного катода с большой площадью.

Наиболее популярной, ввиду простоты производства вакуумного прибора, на данный момент является диодная конструкция (рис. 5), которая применяется в плоских источниках света небольшой яркости ($1000 - 5000 \text{ кд м}^{-2}$). Такие приборы могут использоваться, например, для подсветки жидкокристаллических экранов [90].

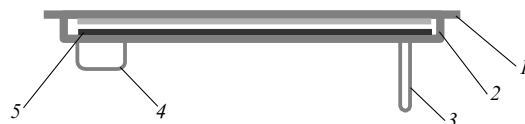


Рис. 5. Плоский источник света диодной конструкции: 1 — анод, покрытый слоем люминофора, 2 — стеклянный спейсер, 3 — штенгель, 4 — геттерный объём, 5 — плоский автокатод.

Ниже представлена часть из разработанных в лабораториях МФТИ конструкций плоских автоэмиссионных источников света.

Одна из ранних конструкций основана на применении пучков углеродных волокон [91–95]. Пучки углеродных волокон закреплены на металлической матрице. Параллельно эмитирующей плоскости пучков углеродных волокон на расстоянии от неё в несколько десятых долей миллиметра расположен модуляторный электрод. Отверстия модуляторного электрода соосны с эмитирующими концами пучков волокон. Катодная и модуляторная пластины разделены изолятором, находящимся внутри вакуумного объёма, ограниченного стеклянными пластинами. На верхнюю пластину нанесены слой проводящего прозрачного покрытия (ITO) и люминофор. Внешние подсоединения анода, модулятора и катода осуществляются через электрические выводы.

Благодаря своим уникальным свойствам катод из терморасширенного графита (ТРГ) может быть применён при создании планарных автокатодов большой площади, способных надёжно функционировать в диодном режиме. Данный тип катодов может также использоваться в плоских источниках света с различной площадью как со сплошной засветкой, так и с требуемым рисунком (знаки, цифры, указатели и т.п.) — статических информационных дисплеях. Такие приборы отличаются низким энергопотреблением и являются достаточно простыми в изготовлении.

Технология получения эмиссионных центров на поверхности фольги ТРГ позволяет создавать плоские автокатоды с различной площадью: от нескольких единиц до нескольких сотен квадратных сантиметров. При этом

возможно создание автокатодов с различным рисунком эмитирующей поверхности.

Простейший источник света на основе катода из ТРГ имеет диодную конструкцию. На стеклянную пластинку, покрытую проводящим слоем ИТО, наклеивается фольга ТРГ, на которой по заданному рисунку формируются кратеры. Анод изготавливается из стекла, покрытого слоем ИТО с нанесённым на него люминофором. Расстояние между анодом и катодом задаётся с помощью стеклянных спейсеров (от англ. spacer — прокладка, распорка) толщиной 1 мм. Так как толщина фольги ТРГ 200 мкм, а средняя глубина кратера 200–250 мкм, расстояние между эмиссионными центрами и анодом составляет около 550 мкм.

Данный прибор работал в непрерывном режиме. Площадь анода равнялась $4,8 \text{ см}^2$. При приложении напряжения 1200 В (напряжённость электрического поля 2 В мкм^{-1}) плотность тока на аноде составила $0,2 \text{ мА см}^{-2}$. Яркость данного прибора $\approx 3000 \text{ кд м}^{-2}$.

Наиболее простые конструкции получаются при использовании в качестве материала для автокатодов конструкционных графитов [96]. Выделяют три основных этапа изготовления диодного источника света с автокатодом из конструкционного графита. На первом этапе из куска конструкционного мелкозернистого плотного графита (МППГ) (в данном случае марки МППГ-6) вырезалась заготовка размером $1,0 \times 1,5 \text{ см}$. В заготовке электроэрозионной резкой проделывались пазы шириной 0,5 мм с шагом 1,5 мм, в которые устанавливались пластины из корундовой керамики типа "поликор" толщиной 0,5 мм. Полученная конструкция сверху заливалась шликером (густой тестообразной массой) стеклоцемента.

После кристаллизации стеклоцемента в муфельной печи при температуре 400°C его шлифовывали вместе с керамикой до появления поверхности графита. Затем проводилось шлифование абразивным порошком с калиброванным размером зерна (в данном случае 28 мкм). Поскольку твёрдость поликора близка к твёрдости абразива, а графит значительно мягче, поверхность графита шлифовывается ниже уровня плоскости торцов поликоровых пластин на величину, близкую к размеру частиц абразива. Тем самым простыми технологическими средствами создавался постоянный малый зазор (30 мкм) по всей плоскости катода. На спейсеры накладывался экран с люминофором и проводящим покрытием.

Шлифование поверхности графитового автокатада абразивным порошком, помимо прочего, создаёт необходимый для эффективной автоэмиссии рельеф поверхности.

Спейсеры обеспечивают, кроме поддержания точно заданного расстояния анод–катод, равномерную нагрузку на анодную и катодную пластины для компенсации атмосферного давления и пондеромоторных нагрузок во время работы прибора. Испытания макета прибора проводились в режиме постоянного напряжения в вакуумной камере с давлением остаточных газов на уровне 10^{-6} – 10^{-7} мм ртутного столба.

Автоэмиссионное изображение состояло из мелких ярких точек, расположенных почти вплотную друг к другу. Этот факт равномерной засветки экрана поверхностью графитового катода характеризует высокую равномерность микровыступов на поверхности графита. Предварительные эксперименты по созданию источника

света диодной конструкции на основе автокатада из конструкционного графита продемонстрировали перспективность такого подхода. Оценки показывают, что при использовании тонкоплёночного люминофора и более мелкого абразивного порошка для шлифования автокатодных структур можно ожидать получения диодных структур с рабочим напряжением 200–300 В.

В настоящее время многие организации различных стран конкурируют между собой на пути создания тонких и прочных автоэмиссионных плоских источников света нового поколения с большим сроком службы. Как отмечалось выше, большинство таких источников имеет диодную конструкцию ввиду простоты производства вакуумного прибора.

Так, в изобретении [97] описаны автоэмиссионный источник света и способ его изготовления. Этот способ включает в себя этап подготовки анодной пластины: изготовление пластины из стекла; нанесение на неё слоя люминофора; установка пластины с люминофором на подложку; размещение спейсеров на необходимой высоте по окружности над стеклянной пластиной; установка стальной пластины над спейсерами и стеклянной пластиной; помещение собранной анодной пластины в высокотемпературную печь для размягчения стеклянной пластины и запрессовывания люминесцентного слоя внутрь её поверхностного слоя через стальную пластину. Люминесцентный слой на анодной пластине автоэмиссионного источника света, образованный методом сильного прижатия к стеклянной пластине, не может быть разрушен воздействием пучков электронов даже в течение длительного времени, а плотная и гладкая алюминиевая плёнка может способствовать повышению световой эффективности.

Авторами [98, 99] предложены аналогичный автоэмиссионный источник света и способ его изготовления. Автоэмиссионная анодная пластина состоит из прозрачной керамической базы и сформированного на ней анодного проводящего слоя, который может излучать свет под воздействием пучков электронов. Автоэмиссионный источник света включает в себя анодную и автоэмиссионную катодную пластины. Автоэмиссионная катодная пластина состоит из подложки и образованного на её поверхности катодного проводящего слоя. Анодный и катодный проводящие слои, расположенные напротив друг друга, образуют герметичную вакуумную камеру. Авторы [98, 99] утверждают, что в данном изобретении повышены эффективность воздействия электронов, коррозионная стойкость и износостойчивость. Отмечается также, что автоэмиссионная анодная пластина, используемая в изобретении, обладает равномерным свечением и, кроме того, является дешёвой. Автоэмиссионный источник света имеет высокие световую интенсивность и эффективность и длительный срок службы.

Схожая конструкция описана в работе [100]. Анод плоского автоэмиссионного источника света состоит из: анодной подложки; анодного проводящего слоя, сформированного на проводящей подложке; люминесцентного слоя, нанесённого на анодный проводящий слой. Катод содержит: катодную подложку, расположенную напротив анодной подложки на некотором расстоянии; катодный проводящий слой, сформированный на катодной подложке; электронно-эмиссионный слой, нанесённый на катодный проводящий слой напротив люминесцентного слоя анода.

Главное отличие от представленных выше изобретений заключается в наличии электронно-эмиссионного слоя, который включает в себя стеклянную матрицу со множеством углеродных нанотрубок, металлических проводящих частиц и диспергированным порошком геттера. Катодная и анодная подложки герметично соединены между собой.

Автоэмиссионный катод, предложенный в работе [101] для использования в панелях плоских дисплеев, включает в себя слой проводящего материала и нанесённый на него для образования эмиссионных центров слой плёнки аморфного алмаза, предназначенный для понижения работы выхода электронов. Каждый эмиссионный центр содержит по крайней мере две подобласти с разными электронными свойствами.

Авторами работы [102] предложена плоская автоэмиссионная лампа со стековой структурой. Лампа состоит из следующих элементов: анодной и катодной пластин и плоской панели.

Анодная пластина включает в себя подложку. Катодная пластина, сложенная с анодной, содержит изоляционную и катодную сетки, каждая из которых имеет множество сквозных отверстий. Отверстия анодной и катодной пластин соосны. Панель герметизирована с анодной подложкой для образования вакуумной камеры, в которую помещены анодная и катодная пластины. Электронный пучок с катодной пластины бомбардирует анодную пластину для излучения света. Свет излучается с одной стороны панели через отверстия, а с другой стороны — непосредственно с анодной подложки. Таким образом, автоэмиссионная плоская лампа имеет две светоизлучающие стороны.

Авторы [103] предложили автоэмиссионный светоизлучающий элемент с высокой световой эффективностью. Эмиттер представляет собой углеродные нанотрубки, в которых металл находится на открытой части отверстия наконечника или содержится в части наконечника.

В работе [104] тех же авторов холодный катод состоит из массивной металлической подложки и сформированной на её поверхности автоэмиссионной плёнки, содержащей:

- подложку, состоящую из одного или более металлов из следующего ряда: Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Gd, Ce, Pr, Sm, Eu, Tb, Dy, Er, Ho, Tm, Yb, Mn, Fe, Ni, Co, Ru, Rh, Cu, Al, Ag, Au, Sn, Bi, Zn, Pt и Pd;
- автоэмиссионную подложку;
- органическое связующее.

Задача авторов [105] заключалась в разработке катода автоэмиссионного типа, способного эмитировать большое количество электронов, и лампы автоэмиссионного типа, использующей его.

Такая лампа автоэмиссионного типа содержит катодную и анодную подложки, расположенные напротив друг друга. Множество пирамидальных выступов с трапецевидной формой поперечного сечения нанесено на поверхность катодной подложки. Катодные электроды, на которых находятся эмиттеры, расположены на боковых гранях этих пирамид. Затворный электрод установлен посередине между основанием выступа, прилегающим к катодной подложке, и вершиной выступа. Прозрачный электрод, на который нанесён люминофор, установлен на прозрачную анодную подложку, имеющую волнообразную форму, почти полукруглую над каждым из катодных эмиттеров.

Автоэмиссионный двусторонний источник света [106, 107] состоит из двух анодов и расположенного между ними катода. Каждый анод имеет подложку и образованный на ней проводящий слой, покрытый люминесцентным слоем. Катод имеет металлическую сетчатую основу, одна из поверхностей которой обращена непосредственно к первому аноду, а другая — ко второму. Каждая из поверхностей сетки покрыта электронно-эмиссионным слоем, расположенным напротив соответствующего люминесцентного слоя одного из двух анодов. Каждый электронный слой содержит стеклянную матрицу с массивом углеродных нанотрубок, металлическими проводящими частицами и диспергирующими порошками геттеров.

Эффективным способом повышения равномерности излучаемого света является использование вторично-эмиссионных материалов. Так, например, перед авторами [108] стояла задача значительно повысить равномерность излучаемого света по всей площади люминесцентной поверхности. С этой целью в конструкцию автоэмиссионного источника света был включён сетчатый электрод со вторично-эмиссионным материалом, в котором имеются отверстия для прохождения сквозь них электронов. Этот электрод расположен между анодным электродом с плёнкой люминофора и электродом автоэмиссионного катода. В качестве вторично-эмиссионного материала используется тонкая изоляционная плёнка.

Целью работы [109] являлась разработка источника электронов автоэмиссионного типа с улучшенной способностью детектирования сигнальных зарядов благодаря уменьшению плотности тока экранирующего электрода и тем самым увеличению плотности рабочего тока (рис. 6).

Автоэмиссионное устройство включает в себя: матрицу эмиттеров, содержащую большое количество источников электронов; фотоэлектрическую плёнку, в которой под действием электронных пучков, излучаемых эмиттерами, выполняется фотоэлектрическое преобразование; расположенный между матрицей эмиттеров и фотоэлектрической плёнкой электрод с множеством сквозных отверстий, внутренняя поверхность которых покрыта плёнкой из вторично-эмиссионного материала, испускающего электроны.

Аналогичное автоэмиссионное устройство [110] включает в себя изоляционную подложку, испускающий электроны электрод, вторично-эмиссионный слой, диэлектрический слой, катодный электрод, электронно-эми-

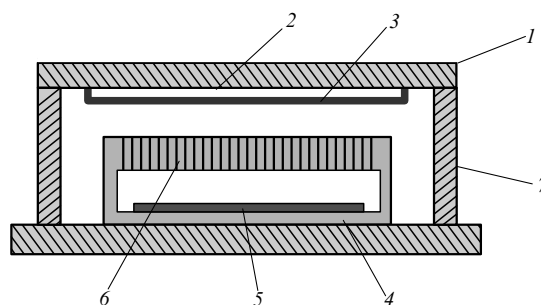


Рис. 6. Источник электронов автоэмиссионного типа: 1 — анод, 2 — проводящее покрытие, 3 — плёнка фотоэлектрического преобразования, 4 — катод, 5 — эмиссионный материал, 6 — вторично-эмиссионный электрод, 7 — опорные элементы.

сионный слой. Испускающий электроны электрод находится на поверхности изолирующей подложки. Вторично-эмиссионный слой расположен на поверхности испускающего электроны электрода. Катодный электрод отделён от излучающего электроны электрода диэлектрическим слоем. Поверхность катодного электрода, ориентированная по излучающему электроны электроду, определяет расположение в нём выходного отверстия для электронов. Электронно-эмиссионный слой, находящийся на поверхности катодного электрода, также ориентирован по испускающему электроны электроду.

Задача работы [111] заключалась в разработке автоэмиссионного источника электронов, обладающего как высокой надёжностью, так и улучшенными эмиссионными характеристиками, и предложении светоизлучающего устройства, использующего этот источник электронов.

В светоизлучающем устройстве [111] автоэмиссионный источник электронов имеет нижний и верхний электроды, расположенные напротив друг друга. Между ними находится пропускающий электроны слой, оптимальная толщина которого была подобрана авторами [111] посредством её постепенного и непрерывного изменения в ходе серии экспериментов. Автоэмиссионный источник расположен напротив покрытого слоем люминофора коллектора электронов, излучающего свет посредством возбуждения газа ксенона. Светоизлучающее устройство управляется напряжением, приложенным между коллектором электронов и автоэмиссионным источником электронов.

Авторами [112] предложено достаточно интересное изобретение (рис. 7), которое может существенно повысить эффективность автоэмиссионного источника света.

Конструкция данного источника света включает в себя:

- по меньшей мере одну катодную ленту, расположенную над базовой структурой;
- по меньшей мере один эмиссионный выступ, расположенный над катодной полосой и электрически с ней соединённый;
- находящийся над катодной лентой изоляционный слой по крайней мере с одним отверстием для эмиссионного выступа;
- анодные полосы (по меньшей мере — одну), расположенные над изоляционным слоем, где катодные и анодные полосы организованы в прямоугольную $m \times n$ -

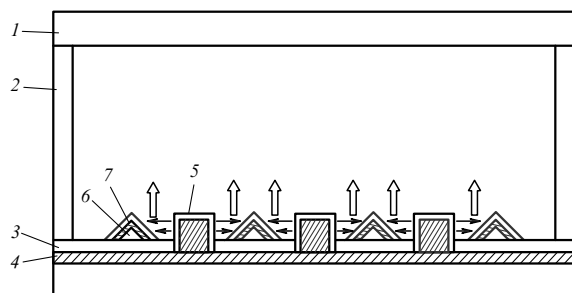


Рис. 7. Светоизлучающее устройство автоэмиссионного типа: 1 — прозрачный экран, 2 — опорный элемент, 3 — изоляционный слой, 4 — катодная лента, 5 — эмиссионный выступ, 6 — анод, 7 — люминофор.

матрицу (m и n — соответственно число катодных и анодных полос);

- по крайней мере одну анодную полосу, индивидуально управляющую соответствующим эмиссионным выступом.

В предложенной конструкции слой люминофора расположен над управляющей поверхностью.

Задача авторов [113] заключалась в разработке простого в изготовлении и дешёвого автоэмиссионного источника электронов, который может стабильно эмитировать электроны.

Автоэмиссионное устройство [113] изготавливается следующим образом: поверхность проводящей подложки с помощью метода химического осаждения из паровой фазы покрывают слоем пористого поликремния. Материал для покрытия в виде газа распыляется на подложку, сделанную из металла с высокой точкой термического закрепления, нагретого до высокой температуры, при которой образуется слой окисленного или азотированного пористого поликремния, затем на этот слой наносится тонкая металлическая плёнка.

Авторами [114] предложен отличающийся простотой изготовления автоэмиссионный катод из нанотрубок с целью повышения напряжённости электрического поля, увеличения эффективности электронной эмиссии, обеспечения её однородности и стабильности.

Катод автоэмиссионного типа для эмитирования электронов под действием сильного электрического поля дополнен трёхмерной структурой, представляющей собой шаблон со множеством выступов, сформированных на подложке. Высота каждого выступа подбирается таким образом, чтобы отношение зазора между смежными выступами к их высоте составляло примерно от 1:2 до 1:6.

С целью решения задачи предотвращения деградации люминофора авторы [115] предложили автоэмиссионный источник света, в котором поставленная задача решена посредством обеспечения эффективного теплоотвода. Источник сконструирован следующим образом:

- люминофор и анод частично заходят друг на друга на внутренней поверхности светоизлучающей панели;
- автоэмиссионный катод расположен на некотором расстоянии от анода;
- линейные проводящие элементы в виде полос или матрицы нанесены на люминофор.

Данное конструктивное решение, по словам авторов, позволяет также объединить эмиссионную люминесценцию всей светоизлучающей поверхности.

Отдельно стоит остановиться на рассмотрении плоских автоэмиссионных источников света, в которых катодами служат многоострийные источники электронов. В качестве примера можно привести автоэмиссионный источник света [116], который включает в себя подложку, катодный проводящий слой, эмиссионную структуру, содержащую множество электронных эмиттеров, прозрачную подложку, анодный слой и люминесцентный слой.

На катодном проводящем слое, сформированном на подложке, расположена эмиссионная структура, которая представляет собой плёнку из углеродных нанотрубок, имеющих заданную ориентацию. Анодный слой, покрытый люминесцентным слоем со стороны, обращённой к электронным эмиттерам, сформирован на прозрачной

подложке, которая отделена от катодного проводящего слоя.

Представленный авторами [117] источник света, имеющий подобную конструкцию, содержит подложку, катод, изоляционный слой, светопреобразующий анод и хотя бы один люминесцентный слой. На поверхности подложки сформирован катод с жёсткими электронными эмиттерами, на который нанесён изоляционный слой. Расположенная напротив автоэмиссионного эмиттера светопреобразующая поверхность анода, покрытая по крайней мере одним люминесцентным слоем, образует вместе с катодом вакуумную камеру. Такой источник света может быть включён, например, в модуль подсветки.

Автоэмиссионная часть предложенного в работе тех же авторов [118] автоэмиссионного источника света включает в себя: изоляционный слой, сформированный на катоде; эмиссионную структуру с массивом автоэмиссионных эмиттеров, расположенных на столбах из кремния и углерода, которые находятся на изоляционном слое. Автоэмиссионные эмиттеры, имеющие диаметр от 0,5 до 10 нм, содержат молибден.

Авторами [119] предложено автоэмиссионное устройство для испускания белого света. Устройство включает в себя сборную катодную пластину с острыми катодами, находящуюся напротив неё на некотором расстоянии сборную анодную пластину и вспомогательный корпус для обеспечения тесной связи сборной катодной пластины со сборной анодной пластиной. Сборная анодная пластина имеет прозрачную подложку, которая может излучать жёлтый свет при облучении синим светом. Анод и слой синего катодолюминесцентного материала расположены на поверхности стеклянной подложки.

Многими авторами представлен ряд изобретений, в конструкциях которых для повышения эффективности и снижения стоимости автоэмиссионного источника света используется отражение. Например, в работе [120] предложена наиболее простая реализация такой конструкции, основными частями которой являются: анодный электрод, толщина которого подбирается исходя из величины входного давления; сформированный на нижней стеклянной подложке отражатель, обладающий высоким электрическим сопротивлением и хорошей отражательной способностью; люминесцентный слой, образованный на этом анодном электроде; устройство излучения электронов; верхнюю стеклянную подложку, сформированную на катодном электроде. Изобретение повышает световую эффективность и является простым в производстве, благодаря чему снижается его стоимость. В предложенном изобретении может быть также обеспечена высокая надёжность за счёт хорошего отвода тепла, выделяющегося при работе источника света.

В аналогичном изобретении, представленном в [121], автоэмиссионный катод состоит из электропроводного слоя и сформированных на нём эмиссионных центров. Основное отличие заключается в том, что эмиссионные центры образованы из материала, предназначенного непосредственно для эмиссии электронов, и геттерного материала для поглощения газов. Анод состоит из электропроводного слоя и сформированного на нём люминесцентного слоя.

Авторами [122] была доработана конструкция планарного источника света для того, чтобы упростить и

одновременно сделать более точной его сборку. С этой целью на катодную структуру наносятся специальные выемки для установки эмиссионного слоя.

Катодная пластина состоит из описанной выше катодной структуры, сложной решётчатой структуры и эмиссионного слоя. Катодная и решётчатая структуры установлены параллельно на базовой пластине, а каждая из катодных структур имеет по крайней мере одну выемку с находящимся в ней эмиссионным слоем.

В работе [123] предложены автоэмиссионный плоский источник света и способ его изготовления. Автоэмиссионный плоский источник света содержит анод, катод, прозрачную для света пластину и разделительный элемент.

Анод и прозрачная пластина отделены друг от друга. Откачиваемый объём образован катодом, анодом, разделительным элементом и прозрачной пластиной. Анод включает в себя анодную подложку, металлический отражающий слой, расположенный на этой подложке, и светоизлучающий слой, находящийся на его поверхности. Благодаря данной конструкции была увеличена теплопроводность плоского автоэмиссионного источника света. Среди возможных областей применения авторами указываются подсветка жидкокристаллических дисплеев, а также использование в других осветительных приборах.

Плоский источник света [124], основанный на автоэмиссии, включает в себя: светопроницаемую подложку; прозрачный электропроводный катод; электронный эмиттер; анодный слой; светоотражающий слой; люминесцентный слой. Прозрачный электропроводный слой катодного электрода находится на поверхности светопроницаемой подложки. Электронные эмиттеры расположены на прозрачном электропроводном слое катодного электрода. Анодный электрод установлен на некотором расстоянии напротив прозрачного электропроводного слоя катодного электрода. Светоизлучающий слой сформирован на отражающем анодном слое напротив прозрачного электропроводного катодного слоя.

Авторы [125] поставили перед собой задачу эффективно предотвратить деформацию или повреждение передней панели вследствие температурной разницы между ней и анодом со слоем люминофора.

С этой целью ими был использован источник электронов для плоского источника света, состоящий из массива автоэмиссионных эмиттеров, расположенных в одной плоскости практически параллельно друг другу. Кроме того, на анод был нанесён слой люминофора, излучающего свет посредством переизлучения электронов, испускаемых автоэмиссионной частью на внутренней поверхности передней панели. В результате применения данной конструкции были минимизированы температурные напряжения, возникающие вследствие теплового расширения или сжатия, между передней панелью и деталями анода с люминофором.

Главная отличительная особенность изобретения [126] заключается в наличии чашеобразной отражающей структуры. В [126] описывается метод изготовления автоэмиссионного источника света, который включает в себя эмиттерную структуру, содержащую массив автоэмиссионных источников электронов на подложке, и отражательную структуру, представленную множеством чашеобразных отражателей с нанесённым на них

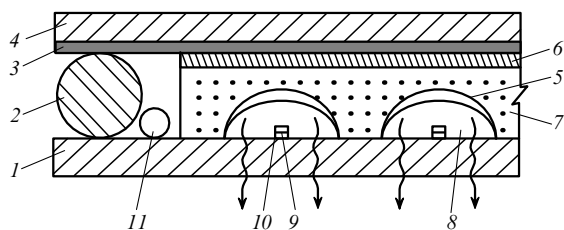


Рис. 8. Плоский осветительный модуль автоэмиссионного типа с линейчатыми автокатодами, использующий эффект отражения: 1 — нижняя стеклянная пластина для вывода светового излучения, 2 — уплотнитель, 3 — прозрачное проводящее покрытие (ПТО), 4 — верхняя стеклянная пластина, 5 — люминесцентный слой, 6 — черное покрытие, 7 — алюминиевый анод, 8 — полужилиндрическая канавка, 9 — линейчатый катод (серебряная паста), 10 — нанотрубки, 11 — геттер.

люминесцентным слоем. Отражающая структура расположена напротив эмиттерной структуры.

В изобретении [127] структура плоского автоэмиссионного источника света включает в себя, помимо уже известной структуры, анодную площадку со сформированным на ней люминесцентным слоем. Благодаря пространственной структуре люминесцентного слоя и шероховатой поверхности анодной площадки увеличивается площадь светящейся поверхности, в результате чего возрастает световая эффективность плоского источника света. На практике шероховатости поверхности анодной площадки можно достичь, сделав на ней множество выступов или установив большое количество вогнутых зеркал.

В изобретении [128] (рис. 8) автокатод состоит из полосок серебряной пасты, на которой равномерно и параллельно друг другу расположены нанотрубки, образующие собственно автоэлектронный катод. Катодные полоски находятся в центре канавок, имеющих форму половины цилиндра. Сами канавки, которые также расположены параллельно на одинаковом расстоянии друг от друга, проделаны в алюминиевой плате, которая является анодом. На внутренние поверхности канавок нанесены люминофоры соответствующих цветов.

Электроны, эмитированные автокатодами, бомбардируют слой люминофора на аноде, что вызывает его возбуждение и, соответственно, свечение. Это свечение отражается от внутренней поверхности анодных канавок и проходит сквозь нижнюю стеклянную пластину. Благодаря форме канавок световые потоки рассеиваются и переотражаются, что значительно увеличивает равномерность свечения источника света.

Автоэмиссионное устройство подсветки [129] включает в себя:

- отдельные первую и вторую подложки, строго параллельные друг другу;
- первый и второй анодные электроды, находящиеся напротив друг друга на внутренней поверхности первой и второй подложек;
- отделенный катодный электрод, строго параллельный анодным электродам, расположенный между первой и второй подложками.

Устройство также включает в себя эмиссионный источник электронов, расположенный на катодном элек-

троде, для эмитирования электронов под действием электрического поля первого или второго анодного электродов.

Изобретенные плоские источники света большой площади, как правило, скомбинированы из множества небольших источников света. Так, изобретения [130, 131] относятся к одно- или двусторонним объединенным автоэмиссионным источникам света (либо к дисплейным модулям [132]) без вакуумно-изолированных стоек, состоящим из множества модулей источников света. Автоэмиссионные модули источника света, независимо расположенные на подложке, скомбинированы для формирования автоэмиссионного источника света. Тот факт, что объединенный автоэмиссионный плоский источник света с большой площадью не нуждается в вакуумных изоляционных стойках, решает проблему накопления заряда и поддержания существующего уровня вакуума в вакуумных изоляционных стойках автоэмиссионного устройства. Благодаря данному факту, по словам авторов, эффективно продлевается срок службы автоэмиссионного источника света, повышается однородность света и возникает возможность реализовать на практике автоэмиссионный плоский источник света с большой площадью.

В изобретении [133] автоэмиссионный источник света включает в себя множество спейсеров, каждый из которых присоединен к прозрачной опорной подложке. Иными словами, устройство содержит структуру из множества пикселей (которая может включать в себя первые электроды), расположенных над прозрачной подложкой. При этом слой, испускающий свет, находится над первыми электродами, а вторые электроды расположены над опорной подложкой, где первые и вторые электроды установлены в заданном зазоре в области низкого давления. Каждое множество пикселей может также содержать один или несколько массивов наностолбчатых эмиттеров электронов, расположенных над одним или несколькими вторыми электродами.

В работе [134] предложен аналогичный поверхностный автоэмиссионный источник света для поддержания существенной светоизлучающей эффективности посредством формирования первого и второго конструктивных уплотнений в вакуумном состоянии.

Главное отличие изобретения [135] от описанных ранее заключается в количестве и расположении наноразмерных электронных эмиттеров, которые могут включать в себя первый электрод, электрически соединенный с первым источником питания, и второй электрод, электрически соединенный со вторым источником питания, а также:

- массив наностолбчатых электронных эмиттеров, расположенных на втором электроде;
- массив наностолбчатых электронных эмиттеров, расположенных в диэлектрической матрице.

При этом один конец каждого из множества наностолбчатых электронных эмиттеров может быть соединен со вторым электродом, а другой конец, предназначенный для эмитирования электронов, располагается напротив первого конца.

Цель работы [136] заключалась в повышении качества света, испускаемого передней стороной плоской панели автоэмиссионного источника света, в котором электронные эмиттеры в форме проводов расположены во множестве выемок.

Плоский источник света, предложенный в работе [137], обладает большим размером и малой толщиной и имеет переднюю плоскую панель, устойчивую к деформациям под действием внутреннего давления.

Область пространства между плоскими передней и задней панелями вакуумно-герметична. Передняя панель предохранена от деформации под действием атмосферного давления на границе с вакуумом посредством включения в вакуумную область жёстких рёбер. Между этими рёбрами расположены две автоэмиссионные структуры в форме проводов. Между ними находится анод, также имеющий вид провода, покрытого слоем люминофора.

Авторы [138] представили воспроизводимое устройство, обладающее высокими яркостью и равномерностью излучаемого света. Устройство имеет большую поверхность и небольшую толщину передней панели, благодаря чему передняя панель устойчива к деформации под действием внутреннего давления, несмотря на отсутствие в ней рёбер жёсткости.

Передняя панель, представляющая собой куполообразную структуру, расположена напротив задней панели. Анодная плёнка с люминофором сформирована на внутренней поверхности передней панели, а катоды в форме проводов расположены на внутренней поверхности задней панели. Геометрия задней панели подбирается таким образом, чтобы расстояние между каждым катодом и анодом было одинаковым.

Схожий по конструкции источник света [139] также включает в себя заднюю пластину; переднюю пластину со сформированным на ней анодным слоем; катод, установленный между ними. Катод включает в себя множество сформированных на нём электропроводящих носителей. Автоэмиссионные эмиттеры равномерно распределены по анодной поверхности проводящих носителей. Анодный слой имеет множество изогнутых частей, соответствующих проводящим носителям. Автоэмиссионные эмиттеры расположены в основном радиально относительно параллельных друг другу проводящих носителей, которые находятся преимущественно в одной плоскости. Каждый из проводящих носителей по меньшей мере одним своим концом может быть соединён с тяговым устройством, например пружиной.

Для создания сверхъярких источников света предпочтительной является триодная конструкция (рис. 9).

Наиболее распространённым оказалось решение, в котором модулятор располагается между анодом и катодом. Например, в работе [140] предложена автоэмиссионная лампа (АЭЛ), позволяющая, по словам авторов, добиться снижения стоимости эксплуатации и обеспечить большой срок службы, при этом электронная эмиссия осуществляется при низких напряжениях. АЭЛ

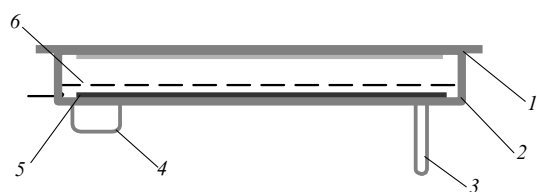


Рис. 9. Триодная конструкция плоского источника света: 1 — анод, покрытый слоем люминофора, 2 — стеклянный спейсер, 3 — штенгель, 4 — геттерный объём, 5 — плоский автокатод, 6 — модулятор(ы).

включает в себя катодный, затворный и анодный электроды, расположенные в вакуумном корпусе. Катодный электрод сформирован на выступающей или вогнутой части подложки из наноглеродного материала.

В работе [141] предложена аналогичная по конструкции автоэмиссионная лампа, содержащая множество катодных электродов для формирования первой подложки, анодного электрода, образованного под второй подложкой напротив катодного электрода, люминесцентный слой из красной, зелёной и синей (RGB) составляющих, сформированных на анодном электроде в наклонном направлении, множество эмиттеров, сформированных на катодном электроде согласно RGB-шаблону. Такая АЭЛ, обладающая малым временем включения, может применяться в качестве элемента подсветки, а наличие различных цветов позволяет осуществлять их последовательное включение.

Авторами [142] заявлено автоэмиссионное устройство, в котором металлическая затворная подложка расположена между анодной и катодной подложками для использования в качестве затворного электрода, индуцирующего электронную эмиссию. Это устройство имеет простую конструкцию и является простым в изготовлении. Также стоит отметить, что ток протекает через несколько электрически изолированных катодов, что может быть использовано для локальной подстройки яркости.

Авторы [143] представили устройство подсветки автоэмиссионного типа, в котором увеличен начальный угол расхождения электронов, эмитированных с катода, посредством нанесения на подложку изоляционного слоя.

Множество катодных электродов, параллельных друг другу, сформировано на нижней подложке. Множество изолирующих слоёв высотой от 3 до 10 мкм сформировано в виде параллельных линий, одна из которых находится на подложке, а другие пересекают массив катодных электродов. По крайней мере на одном из катодных электродов между изолирующими слоями сформирован эмиттер из автоэмиссионного материала.

Задача работы [144] состояла в разработке системы освещения автоэмиссионного типа, устойчивой к внешним ударам, которые приводят к изменению расстояния между катодной маской и затворным электродом.

Предложенная система освещения содержит интегрированную структуру затворного электрода в составе изолятора, собственно затворного электрода и катодной маски, не требующую позиционирования между катодной маской и затворным электродом при сборке. Более того, часть компонентов могут быть объединены друг с другом, что даёт экономии труда при сборке. Благодаря тому что изолятор присоединён к затворному электроду и катодной маске, их относительное взаиморасположение будет сохраняться даже при внешнем ударе.

Авторы [145] представили осветительную систему, особенность которой заключается в наличии защиты затворного электрода от попадания на него электронов, излучённых автокатодом.

С этой целью диафрагма на открытой части затворного электрода осветительной системы сделана больше, чем диафрагма на открытой части изолятора. Конфигурация, при которой изолятор выступает над открытой частью, через которую проходят электроны, предотвра-

щает столкновение автоэмиссионных электронов с затворным электродом. Таким образом может быть решена проблема столкновения автоэмиссионных электронов с затворным электродом.

Целью работы [146] являлась разработка автоэмиссионной системы освещения с подавлением неравномерности эмиссионного света.

Предлагается перемещать эмиссионную часть катода (с помощью маски) и открытую часть затворного электрода в параллельных направлениях с целью изменения траекторий электронов. Таким образом можно заставить электроны облучать различные части анода, что позволяет снизить неравномерность эмиссионного свечения.

Авторами работы [147] представлены автоэмиссионное устройство триодного типа и способ его изготовления с помощью метода трафаретной печати на изогнутой или плоской подложке, включающий в себя следующие этапы:

- одновременное формирование пространственно разделённых для предотвращения короткого замыкания или помех катода и затвора на подложке с использованием различных трафаретов;
- нанесение автоэмиссионного слоя на катоды;
- формирование прозрачного проводящего слоя и люминесцентного слоя непосредственно на анодной подложке;
- сборка в триодное автоэмиссионное устройство, обеспечивающее параллельное расположение катодной и анодной подложек на некотором расстоянии друг от друга.

В конструкции [147] возможно смещение катода или затвора для локальной настройки света. Затворный электрод может быть также использован в качестве дополнительного эмиттера для повышения автоэмиссионной эффективности и продолжительности работы устройства.

Отличительная особенность автоэмиссионного источника света [148] заключается в том, что управляющие электроды располагаются ниже эмиссионной поверхности катодов. Эмиссионный источник расположен на катодной структуре, напротив которой находится анод с люминесцентным слоем. Геттер, обеспечивающий необходимый уровень вакуума, расположен вне световылучающей области на катодной или анодной пластине. В данном источнике света предусмотрены экраны, предохраняющие анод и катод от потока ионов металла, генерируемого геттером.

В предложенной в работе [149] автоэмиссионной лампе затворные и катодные проводники расположены на одном уровне параллельно друг другу. Конструкция лампы включает в себя: проводящую плёнку, размещённую на внутренней поверхности плоского переднего стекла; линейный катодный проводник с автоэмиссионной плёнкой; линейный затворный электрод. В данной конфигурации при включении лампы к анодному проводнику прикладывается высокий потенциал, при этом проводящая плёнка, катодный проводник и затворный электрод заземлены.

Данную автоэмиссионную лампу авторы предлагают использовать в жидкокристаллическом дисплее в качестве задней подсветки с низким энергопотреблением, высокой светоотдачей и отсутствием всплесков неравномерности света.

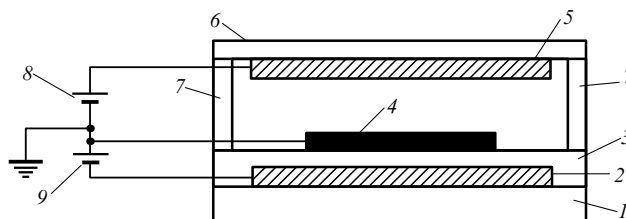


Рис. 10. Автоэмиссионный светоизлучающий элемент: 1 — катодная подложка, 2 — управляющий электрод, 3 — изоляционный слой, 4 — эмиссионный слой, 5 — проводящий светоизлучающий слой, 6 — прозрачная подложка, 7 — опорный элемент, 8 — источник питания анода, 9 — источник питания управляющего электрода.

В ряде конструкций предлагается схема автоэмиссионного источника, в которой катод располагается между анодом и управляющим электродом. В качестве примера можно привести работу [150], в которой предложен автоэмиссионный светоизлучающий элемент (рис. 10) с упрощённой структурой управляющего электрода, контролирующей автоэмиссионный ток.

Управляющий электрод, сформированный на подложке, окружён изоляционным слоем. Эмитирующий электроны слой состоит из углеродных нанотрубок, находящихся на изолирующем слое. Проводящий световылучающий слой расположен напротив слоя, эмитирующего электроны. Управляющий электрод находится ниже электронного эмиттера под изолирующим слоем. Таким образом, управляющий электрод имеет простую плоскую конструкцию. Углеродные нанотрубки встроены в сетчатую плёнку. Толщина покрытия из углеродной плёнки по отношению к толщине основания составляет менее 1 %.

В работе [151] представлен автоэмиссионный поверхностный источник света, включающий в себя базовую и прозрачную подложки, расположенные напротив друг друга. Множество затворных электродов, покрытых изоляционным слоем, и множество эмиттеров сформированы на верхней поверхности базовой подложки, а люминесцентный слой образован на нижней поверхности прозрачной подложки напротив эмиттеров.

Схожая конструкция для подсветки экрана дисплея рассмотрена авторами [152]. В этой конструкции для обеспечения равномерности излучаемого света дополнительно установлена диффузионная пластина между поверхностным автоэмиссионным источником света и панелью дисплея.

В работе [153] рассмотрены поверхностный автоэмиссионный источник света и устройство отображения информации на его основе. Этот источник тоже включает в себя две подложки, расположенные напротив друг друга. На одной из них расположены управляющие электроды, которые могут частично находиться под изоляционным слоем, на который нанесён эмиссионный слой. Предусмотрена также возможность электрического соединения электронных эмиттеров и затворов. На поверхность второй подложки нанесён слой люминофора, а третий электрод (анод) расположен на поверхности люминофора.

Авторами работы [154] предложено автоэмиссионное светоизлучающее устройство (рис. 11) с равномерной яркостью световылучающей поверхности. Это устройство состоит из автоэмиссионного источника электро-

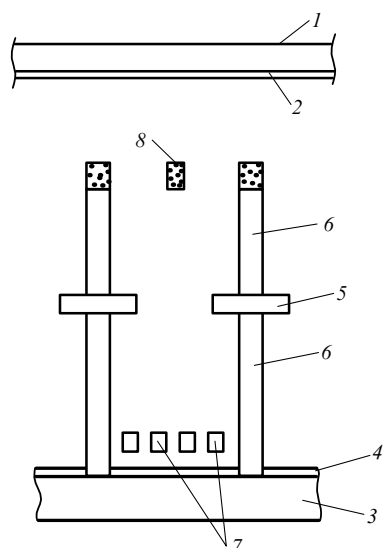


Рис. 11. Светоизлучающее устройство автоэмиссионного типа: 1 — слой люминофора, 2 — анодный электрод, 3 — катодный электрод, 4 — слой углеродных нанотрубок, 5 — катодный электрод, 6 — изолятор, 7 — затворный электрод, 8 — электростатически заряжаемый элемент.

нов, включающего в себя катодный электрод и слой углеродных нанотрубок (УНТ), анодного электрода, затворного электрода и замкнутой изолирующей оболочки, расположенной между автоэмиссионным источником и люминофорной подложкой. Между затворным электродом и стороной люминофора, обращённой к проводящей подложке, установлен катодный электрод, а на том же уровне со стороны изолирующей подложки установлен электростатически заряжаемый от столкновения с автоэмиссионными электронами элемент. Данный элемент конструкции представляет собой ячейку. Множество таких ячеек составляет светоизлучающее устройство.

Плоские автоэмиссионные источники света могут быть применены для создания узкоспециализированных устройств. Например, в работе [155] предложено использовать автоэмиссионное осветительное устройство в качестве экспозиционного источника света для оптической головки принтера. Материалом электронного эмиттера служат УНТ. Данный источник света для принтера, имеющий низкую себестоимость, может использоваться совместно с фоточувствительным барабаном.

Из приведённых выше данных видно, что по своим характеристикам автоэмиссионные планарные источники света, особенно после оптимизации их конструкции, могут составить серьёзную конкуренцию существующим и разрабатываемым конструкциям. К числу достоинств автоэмиссионных планарных источников света относится также то, что они могут использоваться в различных технических устройствах.

5.3. Цилиндрические источники света

Принципиальная схема конструкции с аксиальным расположением элементов показана на рис. 12. В этой конструкции может использоваться катод на основе волокон, нанотрубок или других автоэмиссионных материалов [156].

Важное преимущество цилиндрической конструкции перед планарной состоит в том, что при таком же при-

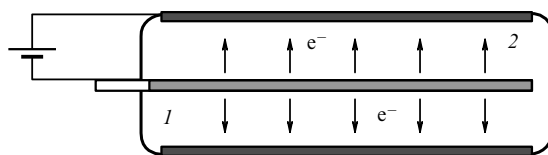


Рис. 12. Конструкция аксиального источника света: 1 — центральная часть с катодной структурой, 2 — цилиндрический анод с люминесцентным покрытием.

ложенном напряжении электрическое поле E , которое в цилиндрической конструкции имеет вид

$$E = \frac{U}{r} \ln \frac{R}{r},$$

больше, чем в планарной конструкции. Здесь R и r — радиусы анода и конструкции катода соответственно, U — напряжение между анодом и катодом. Следовательно, возможно использование диодной конструкции источника света, которая значительно дешевле в изготовлении, чем триодная.

Цилиндрический источник света триодной конструкции с автокатодами из пучков углеродных волокон представлен в работах [157, 158].

Такой источник света имеет обычную конфигурацию анода — стеклянное основание цилиндрической формы с нанесённым на него проводящим покрытием со слоем люминофора. Модулятор представляет собой цилиндр, выполненный из металлической сетки либо изготовленный травлением из металлической фольги. Автокатод изготавливается из углеродных волокон.

Разработаны два варианта цилиндрических автокатодов. В первом варианте углеродные волокна закрепляются между двумя или тремя витыми проволоками. Получается конструкция типа "ёршик", которая очень проста в изготовлении, однако из-за деформации углеродных волокон может происходить их поломка и соответственно их вытягивание из катода электрическим полем. Кроме того, очень трудно выдержать одинаковую высоту волокон автокатаода и, как следствие, эквидистантность расстояния катод–модулятор. Во втором варианте конструкции автокатаода углеродные волокна закрепляются (например, приклеиваются проводящим клеем или припаиваются) между двумя дисками из проводящего материала. Собранные модули насаживаются на несущий стержень необходимой длины. Такая конструкция обеспечивает большую точность соосности автокатаода и модулятора, а также имеет большую механическую прочность. Всё это улучшает равномерность автоэмиссионного тока по поверхности автокатаода и уменьшает вероятность закорачивания промежутка катод–модулятор.

Наибольшее число работ [159–164] посвящено разработкам цилиндрических диодных конструкций, которые более просты в изготовлении, а значит, и более дешёвы в производстве. В таких источниках света в качестве автокатаода используется вольфрамовая проволока или металлический стержень диаметром до 2 мм, поверхность которых покрыта углеродными нанотрубками. Во всех работах длина конструкции составляла несколько сантиметров (от 3 до 10 см), а её диаметр равнялся 15–30 мм. Осаждение нанотрубок проводилось в трубчатых реакторах, изготовленных из кварцевых трубок, при темпе-

ратуре 680–850 °С в течение 10–30 мин. Яркость свечения достигала величины около 10000 кд м⁻² при напряжении на аноде 5,4 кВ [159].

Некоторого увеличения эффективности можно достичь за счёт изменения конструкции анода [165, 166]. Основное отличие от предыдущих конструкций — это использование отражающего алюминиевого покрытия, на которое наносится люминофор. Цилиндрический катод диаметром 1 мм располагается соосно внутри цилиндрической стеклянной колбы диаметром 20 мм.

Для повышения мощности источника света и улучшения теплового режима люминофора используются внешние радиаторы, рассеивающие избыточное тепло посредством конвекции [167]. Аналогичная, по сути, конструкция предложена в [168].

Дополнительно увеличить эффективность цилиндрического источника света можно введением в анодную цепь дополнительного электрода [169], который уменьшает падение напряжения по длине колбы и тем самым вероятность микроразрядов, вызываемых накоплением электронов, а также несколько уменьшает локальные изменения температуры люминофорного покрытия.

Конструкция вспомогательного электрода может изменяться в широких пределах: от сетки до спирали или просто параллельного автокатоду проводника, расположенного на образующей цилиндра.

Более прочное автокатодное покрытие [170, 171] состоит из смеси нанотрубок, металлических проводящих частиц и геттерного порошка, которые диспергированы в стеклянной матрице. Этот состав покрывает катодный стержень ровным слоем, что обеспечивает равномерную эмиссию по поверхности автокатада.

Увеличение яркости и, соответственно, эффективности автоэмиссионного источника света может быть осуществлено за счёт увеличения в одной колбе количества автокатодов и анодов. Так, в цилиндрическом катодолюминесцентном источнике света [172] используется пять расположенных по окружности анодно-катодных узлов, работающих на отражение. Собранные в блок анодной структуры анодные элементы, закрепляемые держателем, располагаются по оси лампы. В фокусе каждого анодного элемента находятся автокатоды.

Увеличения яркости можно добиться, если автоэмиссионные катоды расположить на несущем стержне, как предложено в [173]. В этом случае шесть автоэмиссионных полос запрессованы вдоль несущего стержня равномерно по окружности. Радиус закругления r автоэмиссионных полос в 10–20 раз меньше радиуса колбы цилиндрической лампы, причём эмиссионный слой выступает над поверхностью несущего стержня на половину радиуса r .

Автоэмиссионное покрытие может быть выполнено из углеродных нанотрубок, а несущий стержень — из никеля.

Цилиндрический источник света сравнительно небольшого диаметра представлен на рис. 13 [174]. В этой конструкции анод расположен внутри стеклянной колбы 1, а люминофор 2 нанесён на центральный металлический анодный стержень 3. Для повышения эффективности свечения на стержень 3 нанесено отражающее покрытие 4, например, из алюминия. Автокатод 5 выполнен в виде металлической спирали, на которой расположены УНТ.

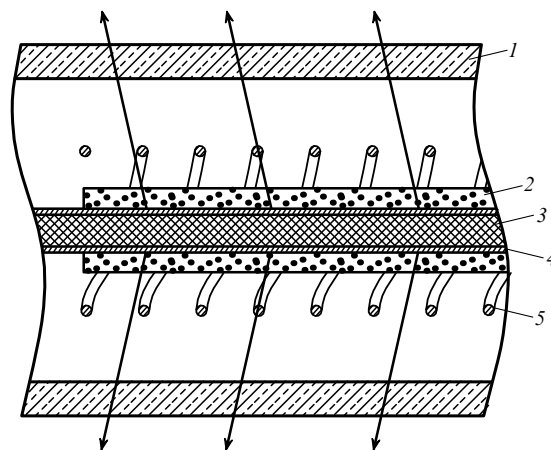


Рис. 13. Цилиндрический источник света с внутренним анодом: 1 — стеклянная колба, 2 — люминофор, 3 — анодный стержень, 4 — зеркальный слой, 5 — автокатод.

Двойное преобразование излучения предложено в [175]. Основное достоинство такой конструкции заключается в повышенной равномерности свечения в видимом диапазоне длин волн.

Стержневой автокатод, покрытый углеродными нанотрубками или нанокристаллами ZnO, излучает электроны, которые возбуждают УФ-люминофор, нанесённый на прозрачное проводящее покрытие, внутри отпаянной кварцевой колбы. УФ-излучение в свою очередь возбуждает фотоллюминофор, который излучает свет в видимом диапазоне длин волн.

Другой подход к созданию цилиндрических источников света предложен в [176, 177]. Источник света представляет собой стеклянную трубку диаметром 15–20 мм и длиной 20–30 см, покрытую изнутри катодоллюминофором. С торцов трубки сварены ножки со смонтированными на них катодно-модуляторными узлами, такими же, как в пальчиковых лампах. В середину трубки впаян электрический ввод — анод, на который подаётся ускоряющее напряжение 10–15 кВ. Электроны, эмитированные автокатадами, на своём пути к аноду выбивают вторичные электроны. Таким образом, значительно повышаются как равномерность свечения лампы, так и её эффективность.

В экспериментальных образцах эффективность составляла более 20 лм Вт⁻¹, время включения не превышало 0,1 мс.

5.4. Сферические и квазисферические источники света

Среди всех автоэмиссионных источников видимого света отдельную группу составляют источники света, имеющие сферическую или квазисферическую форму колбы лампы (сфера, полусфера, грушеобразная или другая стандартная форма лампы накаливания и т.п.) с осевой симметрией излучающей поверхности, при этом ось симметрии проходит, как правило, через цоколь источника света [178–188].

Пример конструкции таких источников света представлен на рис. 14. Подобная конструкция обычно используется для того, чтобы обеспечить диаграмму направленности светового излучения с высокой угловой равномерностью и большой угловой шириной, иногда значительно превышающей 180°.

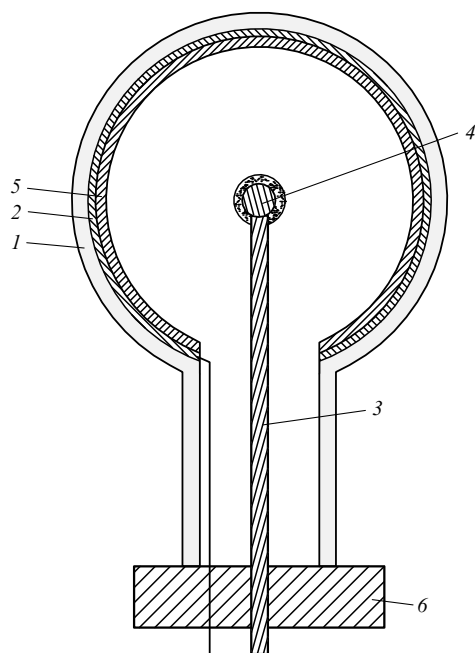


Рис. 14. Схема автоэмиссионного источника света: 1 — прозрачная оболочка, 2 — анод, 3 — поддерживающий элемент, 4 — катод, 5 — слой люминофора, 6 — основание, изготовленное из изолирующего материала (стекло, керамика и т.п.).

Как правило, конструкция таких автоэмиссионных источников света содержит излучающий электроны катод, расположенный в центре замкнутой квазисферической прозрачной поверхности, на которую нанесены прозрачный проводящий слой анода и люминофор [178–181].

Характеристики сферических и квазисферических автоэмиссионных источников света определяются, прежде всего, конструкцией и материалом эмиттера электронов. Варианты таких конструкций широко представлены в патентной литературе. В частности, эмиттер электронов может представлять собой структуру, содержащую металлический проводник, на поверхности которого расположен электрон-излучающий слой, например, из УНТ [178]; слой, содержащий частицы геттера, наноматериала, проводящие металлические частицы и стекло [180]; субстрат с нанесённым проводящим слоем [179]; автоэмиссионный нитевидный катод, состоящий из проводящей проволоки с множеством электрон-излучающих центров на её поверхности (проволока может иметь заданную изогнутую форму: пилообразную, волнообразную или скрученную) [181]. Электрон-излучающими центрами могут быть нанотрубки, нанопроволоки или наностержни, преимущественно образованные УНТ.

Катод может также представлять собой металлический проводящий шарик, покрытый множеством мельчайших излучающих структур, например углеродными нанотрубками [182].

В качестве излучающего автокатода также предлагается катод, состоящий по крайней мере из одного основания, имеющего сложную трёхмерную эмиссионную структуру, а именно ступенчатую, волнообразную или зубчатую, которая со стороны эмиссионной поверхности хотя бы частично покрыта специальным автоэмиссионным слоем наноструктурированного материала [183]. Материалом основания может служить пористый

углеродный материал с высокой однородностью распределения пор по размерам.

Важнейшими конструктивными характеристиками квазисферического автоэмиссионного источника света являются также расположение, форма, структура и материал анода и излучающих поверхностей. В патентах, описывающих конструкции автоэмиссионных источников света, предложены их разнообразные структуры и варианты взаимного расположения катода и анода. Прозрачный анодный проводящий слой может быть нанесён на всю прозрачную поверхность колбы-лампы или на её часть и покрыт люминофором со стороны, обращённой к электрон-излучающему катоду [178–180, 183, 184]. Анод может быть структурирован как отдельный элемент внутри прозрачной колбы лампы, расположенный напротив излучающего автоэмиссионного катода с наличием или отсутствием дополнительных управляющих (фокусирующих, ускоряющих) сеток [181, 183].

Кроме того, анодный слой не обязательно представляет собой прозрачный слой (например, отражающий), покрытый со стороны поверхности, обращённой к автоэмиссионному катоду, люминофором, — при таком анодном слое люминесцентное излучение выходит через прозрачную, свободную от анодного слоя часть колбы [185], возможно, через фокусирующую линзу, встроенную в колбу лампы с внешней или внутренней стороны колбы. В некоторых конструкциях анод, покрытый люминофором, представляет собой расположенный внутри колбы элемент, имеющий сложную форму и непосредственно с колбой не соприкасающийся [187].

В работе [188] рассмотрена полезная модель автоэмиссионной люминесцентной лампы, состоящая из металлического держателя — патрона, пропускающей свет колбы, источника питания, алюминиевого отражающего элемента вогнутой формы и собственно автоэмиссионного светового источника, например, на основе оксида цинка.

Особенностью основания прозрачного анода может быть использование специальных керамик в качестве материала колбы и/или основания анода [179]. В качестве специальных прозрачных керамик предлагается использовать материалы на основе $Y_2SiO_5:Tb$, $Y_2O_3:Eu$, $Gd_2O_2S:Tb$, $LaAlO_3:Tm$, $LaGaO_3:Tm$. В качестве проводящих прозрачных анодных слоёв предлагается применять тонкие плёнки ИТО [179].

В ряде патентов описаны, наряду с конструкциями автоэмиссионных источников, процедуры нанесения излучающих слоёв катода, например режимы и атмосфера спекания углеродной основы излучающей поверхности и формирования наноструктуры поверхности [178, 179].

В некоторых патентах также рассмотрены различные конструктивные особенности, схемы и последовательность действий при изготовлении проводящих слоёв анода, катода и при их сборке с источниками питания и другими конструктивными элементами лампы, включая такие операции [179], как изготовление анода, катода и опорного устройства, сборка и вакуумная откачка эмиссионного устройства.

6. Особенности источников питания для автоэмиссионных источников света

Поскольку для автоэмиссионных приборов вообще и для источников света в частности необходимо довольно

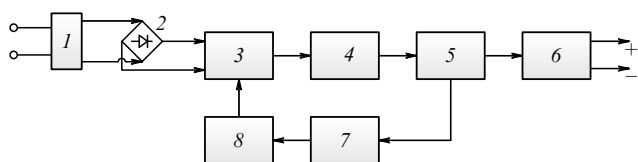


Рис. 15. Схема структуры типового высокочастотного импульсного преобразователя с питанием от сети переменного тока: 1 — фильтр, 2 — выпрямительный мост, 3 — силовые ключи, 4 — импульсный высоковольтный трансформатор, 5 — умножитель напряжения, 6 — фильтр, 7 — цепь обратной связи, 8 — высокочастотный задающий генератор.

большое напряжение (5–30 кВ), но в то же время достаточно малой мощности (до нескольких десятков ватт), большинство перспективных источников питания основано на принципе высокочастотного импульсного преобразования [189–192].

Типовая схема такого преобразования представлена на рис. 15. Сетевой фильтр 1 не позволяет импульсным помехам от схемы попасть в сеть, а диодный мост 2 выпрямляет переменное сетевое напряжение. Полученное напряжение преобразуется в импульсное с частотой обычно 20–100 Гц с помощью задающего высокочастотного генератора 8 и силовых ключей 3, в качестве которых обычно выступают транзисторы. Импульсное напряжение изменяется до промежуточного значения трансформатором 4, а далее умножителем 5 (обычно диодно-конденсаторного типа) доводится до заданной конечной величины.

При необходимости в выходном каскаде устанавливается конденсаторный фильтр 6. Цепь обратной связи 7 необходима для стабилизации выходного напряжения. Источники питания такого типа могут давать необходимое для катодолюминесцентных источников света напряжение. Однако свойства автоэлектронной эмиссии диктуют достаточно специфические требования к характеристикам источника питания, а именно в первую очередь необходимы, кроме сравнительно высокого напряжения, экспоненциальная зависимость эмиссионного тока и небольшая его величина. Поэтому создание источников света с автокатадами требует специального подхода. Ниже рассмотрены некоторые примеры технических решений в этом направлении.

Один из первых источников питания был предложен в [193] (рис. 16). Данный источник содержит высоковольтный выпрямитель 1, нагрузку 2 (автоэлектронная лампа), регулирующий блок 3, резистор обратной связи 4, усилитель постоянного тока (УПТ) 5, источник переменного напряжения 6.

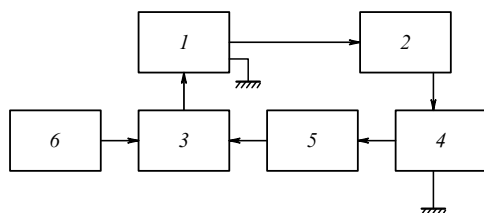


Рис. 16. Стабилизатор автоэмиссионного тока: 1 — высоковольтный выпрямитель, 2 — автоэмиссионная лампа, 3 — регулирующий блок, 4 — резистор обратной связи, 5 — усилитель постоянного тока, 6 — дополнительный источник напряжения.

Напряжение с высоковольтного выпрямителя 1 подается непосредственно на автоэлектронную лампу 2. Ток, проходящий через неё, создаёт падение напряжения на сопротивлении резистора обратной связи 4. Это напряжение сравнивается с установочным напряжением УПТ 5. Разностный сигнал усиливается и подается на регулирующий блок 3. Одновременно на регулирующий блок подается напряжение от источника 6 (которым может быть, например, обмотка сетевого трансформатора). Переменное напряжение, усиленное регулирующим блоком 3, подается на повышающий трансформатор высоковольтного выпрямителя 1. Величина этого напряжения зависит от величины сигнала, поступающего с УПТ.

Наиболее часто предлагается очень эффективная, на наш взгляд, схема управления автоэмиссионным источником — транзисторное управление током автокатада [194, 195]. Источник света содержит токоввод, впаянный в оболочку, люминесцентный экран, модулятор-автокатод, укрепленный на токовводах. Источник света имеет блок управления эмиссионным током, состоящий из резистора и высоковольтного транзистора с заземленным эмиттером.

При работе источника света на экран и модулятор подаются постоянные напряжения соответственно 5–6 кВ и 1,8–2,0 кВ. Регулировку тока источника производят посредством подачи управляющих напряжений на базу транзистора. При выбранных соотношениях параметров источника света и блока управления включение и полное выключение источников света происходят при управляющих напряжениях на базе транзистора в пределах 0,5–1,0 В. Снижение управляющих напряжений позволило улучшить эксплуатационные характеристики и повысить экономичность устройств на основе электровакуумных источников света.

Управление может осуществляться как постоянным, так и импульсным [196] напряжением. При этом импульсный режим может быть предпочтительным, так как в этом случае уменьшается нагрев люминофора, что способствует возрастанию световой эффективности источника света, сокращению расхода энергии и увеличению срока службы лампы.

Дальнейшее усовершенствование источника питания для автоэмиссионного источника света описано в [197]. В предложенной конструкции выпрямитель сетевого напряжения даёт постоянное напряжение около 300 В, которое в преобразователе через генерацию напряжения частотой около 100 кГц преобразуется в постоянное напряжение 3 кВ. Затем резонансный инвертор преобразует это постоянное напряжение в переменное напряжение частотой более 800 Гц. Управление резонансным инвертором осуществляется широтно-импульсным модулированным напряжением.

Напряжение увеличивается до 10–25 кВ высоковольтным умножителем и подается на автоэмиссионный источник света. Керамический конденсатор служит для фильтрации напряжения, полученного от преобразователя. Общее управление блоком питания осуществляется микропроцессорным блоком, который обеспечивает необходимый уровень выходного напряжения, поддерживая необходимые значения параметров преобразователя и инвертора. Обратная связь выходного напряжения с этим блоком управления осуществляется посредством делителя напряжения в высоковольтном умножителе.

Кроме того, микропроцессорный блок управления может следить за уровнем освещённости лампы, адаптируя его к текущему уровню окружающего освещения. Блок управления может включать в себя интерфейс для приёма внешнего сигнала управления.

Резонансный источник питания представлен в работе [198]. Для создания резонансного контура используется индуктивность, которая может быть подключена к лампе последовательно или параллельно.

Бестранзисторная схема источника питания автоэмиссионной лампы предложена в работе [199]. В этом источнике питания кроме стандартных для подобных устройств элементов, таких как выпрямитель и инвертор, имеется серия трансформаторов. Переменное напряжение с инвертора подаётся на первичные обмотки трансформаторов, соединённые параллельно.

Вторичные обмотки трансформаторов, соединённые последовательно, производят высокое напряжение, необходимое для работы автоэмиссионной лампы. Количество трансформаторов определяется рабочим напряжением автоэмиссионного источника света.

Однако такая схема, несмотря на свою простоту, обладает достаточно большими габаритами — она может быть использована в основном для блоков ламп, которые применяются в общественных учреждениях, например в вокзалах, аэропортах, крупных биржах и т.д.

Некоторая модернизация блоков питания для обеспечения работы нескольких ламп, например, в потолочном или настенном светильнике описана в [200], где предложен тот же, но современный способ управления потенциалом модулятора для параллельного включения достаточно большого количества ламп.

Все параллельные схемы и подходы к решению проблемы оптимального питания катодолуминесцентных автоэмиссионных ламп, естественно, не ограничиваются описанными выше.

Ещё один вариант резонансного источника питания для автоэмиссионных катодолуминесцентных ламп, совмещённый с однопроводной линией, приведён в [201].

Сетевое напряжение подаётся на вход фильтра, затем через конденсаторы — на низковольтную обмотку повышающего высокочастотного резонансного трансформатора. Низкопотенциальный вывод высоковольтной обмотки заземлён через конденсатор. Высоковольтная обмотка высокочастотного резонансного трансформатора своим высоковольтным выводом соединена однопроводной линией со светильниками, имеющими естественные ёмкости. Благодаря этому осуществляется подача электрической энергии к светильникам.

Система электрического освещения работает следующим образом. Электрическую энергию от источника энергии переменного тока, проходящую через сетевой фильтр, повышают по напряжению с помощью высокочастотного резонансного трансформатора и создают резонансные колебания тока и напряжения в первичной и вторичной обмотках и в однопроводной линии с частотой 1–100 кГц, равной частоте переменного тока на выходе преобразователя частоты.

Так как однопроводная линия относительно обмотки разомкнута, между током и напряжением в ней существует фазовый сдвиг 90°. Ток по фазе опережает напряжение на 90° и перезаряжает ёмкости однопроводной линии, светильников и собственные ёмкости.

Электромагнитная энергия в виде потока волн тока и напряжения перемещается от вывода с высоким потенциалом вдоль линии через светильники к собственным ёмкостям с более низким потенциалом, представляющим собой результат деления потенциала линии в отношении:

$$\varphi_{11} = \varphi_9 \frac{C_{a-c}}{C_{11} + C_{a-c}},$$

где φ_{11} — потенциал изолированного проводящего тела с естественной ёмкостью по отношению к земле в вольтах; φ_9 — потенциал однопроводной линии системы освещения в вольтах; C_{a-c} — межэлектродная ёмкость (проходная ёмкость анод–катод) люминесцентного светового излучателя в фарадах; C_{11} — электрическая ёмкость изолированного проводящего тела по отношению к земле в фарадах.

В светильниках используют лампы, описанные в разделе 5.4.

Благодаря потреблению электрической энергии в резонансном режиме и применению катодолуминесценции в качестве светоизлучающего механизма генерации катодного пучка электронов, использованию энергоэффективного механизма переноса зарядов — туннельного прохождения электронами потенциального барьера на поверхности эмиттера, а также передаче энергии светильнику по однопроводной линии с малыми потерями в проводнике, работа системы электрического освещения осуществляется с высоким КПД — 80 %–90 %. Кроме того, при питании светильника по однопроводной линии исключается возможность короткого замыкания, поскольку отсутствуют проводники с разностью потенциалов между ними, в отличие от проводников в обычной электрической сети.

7. Специальные катодолуминесцентные источники света

7.1. Цветные источники света

В настоящее время интенсивно разрабатываются два направления использования цветных источников света: подсветка жидкокристаллических дисплейных экранов и отображение информации в устройствах коллективного пользования.

Жидкокристаллические (ЖК) дисплейные экраны широко применяются в качестве индикаторов отображения информации в телевизорах, компьютерных мониторах и т.д. Подсветкой в ЖК-экранах служат линейные или точечные источники света, такие как газоразрядные флюоресцентные лампы и светодиоды. Однако основные недостатки ЖК-экранов состоят в том, что они имеют сложную структуру и технологию изготовления, высокую стоимость производства, большое энергопотребление. Кроме того, при увеличении размеров ЖК-экранов становится затруднительным с помощью обычных источников света обеспечить равномерную яркость свечения по всему экрану.

Поэтому разработка автоэмиссионных источников света, которые имеют малое энергопотребление, более равномерную яркость, мгновенную готовность к работе, обладают экологической чистотой и предоставляют возможность изготовления ламп с различной выходной

мощностью при многообразии конструктивных решений (торцевые, плоские, сферические и т.д.), становится всё более актуальной [202].

Ниже представлено несколько направлений в разработках конструкций катодолюминесцентных ламп подсветки с автоэмиссионными катодами на основе углеродных материалов. Часть из них переключается с плоскими источниками света.

Принцип работы обычного ЖК-экрана демонстрируется в работах [203, 204]. Основу составляет пассивная ЖК-матрица-затвор с поляроидом. С матрицей совмещён светофильтр, имеющий области трёх различных цветов: красного (R), синего (B) и зелёного (G). ЖК-матрица освещается лампой подсветки белого цвета, работающей в непрерывном режиме.

Для того чтобы повысить светотдачу экрана, предлагается удалить светофильтр и использовать многоцветную лампу подсветки с возможностью синхронного включения – выключения цветовых элементов. В этом экране используются точно такие же матрица и поляроид, как и в экране в работах [203, 204]. Однако вместо лампы подсветки белого цвета установлена трёхцветная лампа подсветки с возможностью независимого включения каждого из цветов. Основным требованием к многоцветной лампе является равномерность освещения матрицы для каждого цвета. Размеры цветового элемента лампы подсветки не обязаны совпадать с размером пикселя в матрице. При заданном критерии неравномерности засветки выбор размера цветового элемента лампы подсветки определяет расстояние от лампы подсветки до ЖК-матрицы.

Каждый цветовой элемент лампы подсветки включается после установления на ЖК-матрице изображения, соответствующего данному цвету. При этом эффективное разрешение экрана (количество элементов изображения) возрастает в три раза по сравнению с таковым в работах [203, 204], так как используется каждый пиксель матрицы.

Лампы красного, зелёного и синего цвета включаются последовательно, а элементы ЖК-матрицы включаются синхронно с ними и в требуемой конфигурации с видеоизображением.

Так как размеры цветных элементов ламп не обязаны совпадать с размерами элемента ЖК-матрицы, одно из первых устройств для динамической подсветки состояло из набора пальчиковых источников света трёх цветов [204]. Источники каждого цвета включались последовательно при частоте смены кадров 100 Гц.

Катодолюминесцентные лампы должны обладать скоростями переключения менее 1 мс. Время переключения ламп главным образом зависит от времени разгорания и послесвечения люминофора. Для используемых ламп соответствующие времена удовлетворяют указанному условию.

Потребляемая мощность модуля видеозащита не превосходит 20 Вт или 100 мВт см⁻² в динамическом режиме при скважности включения каждого цвета, равной трём. При яркости отдельного источника 10⁴ кд м⁻² и плотности их упаковки в модуле 2/5 яркость модуля по белому свету составляет 1,3 × 10³ кд м⁻² в динамическом режиме, а яркость изображения на ЖК-экране — 300 кд м⁻².

Другим перспективным направлением создания цветных ламп для динамической подсветки является разработка дисплейных экранов малого разрешения, т.е. с

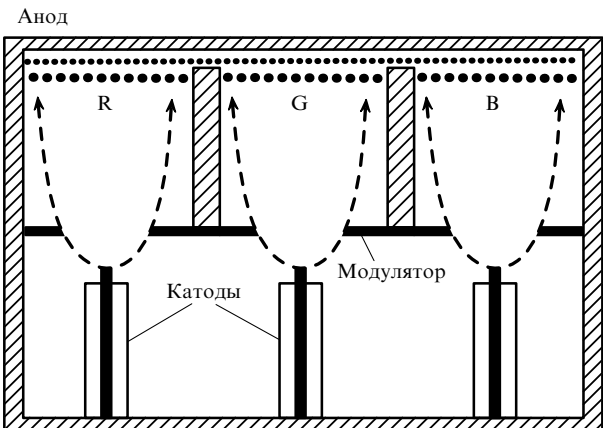


Рис. 17. Схема трёхцветного модуля с автокатадами из углеродных волокон в виде дисплейного экрана малого разрешения.

размерами пикселей несколько миллиметров [205, 206]. На рисунке 17 показана конструкция трёхцветного модуля на основе автокатодов из углеродных волокон.

Анод с обычной конфигурацией имеет секции, покрытые люминофором трёх цветов, размером 10 × 10 мм. Секции разделены перегородками для предотвращения перемешивания электронных потоков.

Формирование электронных пучков осуществляет единый для всех катодов модулятор с соответствующими апертурами, а управление электронными пучками производится системой управления через катодные цепи.

В некоторых случаях для увеличения равномерности засветки экрана целесообразно применение голографических диффузоров [207]. Голографический диффузор — это поверхностная рельефная голограмма, применение которой позволяет регулировать угловое распределение света (до 100°) эффективнее и с более высоким коэффициентом пропускания (более 85 %), чем в традиционных методах (например, с матовым стеклом).

Одной из перспективных областей применения источников света является использование их в видеозащитах, имеющих большие размеры и, соответственно, низкое разрешение [208]. Такие экраны могут применяться как экраны коллективного пользования, которые необходимы для выполнения многих функций, например для трансляции телевизионных передач, отображения рекламы и т.д.

Были изготовлены модули различных размеров. Один из них был создан на основе ламп с автокатадами из пучков углеродных волокон [209]. Его характеристики представлены в табл. 2. В модуле реализовано управление каждым светоизлучающим элементом с помощью контроллера.

Таблица 2. Характеристики модуля большого жидкокристаллического экрана [210]

Характеристика	Значение
Количество ламп	36
Потребляемая мощность	до 40 Вт
Световая эффективность	18 лм Вт ⁻¹
Яркость	до 12000 кд м ⁻²
Угол обзора	180°
Размер пикселя	40 × 40 мм ² (RGB)
Контраст	200 : 1



Рис. 18. Внешний вид полноцветного видеомодуля: 8×8 пикселей (192 лампы).

Для создания больших полноцветных видеоз экранов требуются модули, из которых можно было бы составить экран. Такой модуль должен отображать хотя бы один знак (букву или цифру), иметь собственные системы питания и управления. Это необходимо для того, чтобы упростить электрическую разводку и систему управления экраном в целом. В данном случае к модулю подводятся только сетевое питание и провода управления от компьютера. Внешний вид такого модуля представлен на рис. 18 [211].

Конструктивно модуль представляет собой устройство, содержащее $8 \times 8 = 64$ полноцветных пикселя. Каждый пиксель состоит из трёх ламп красного, синего и зелёного цветов, смешение цветов осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции эмиссионного тока. Общее число ламп 192. Конструкция блока такова, что из этих блоков можно составлять табло любого размера без потери разрешения экрана. Номинальная мощность блока при одновременной работе всех ламп около 200 Вт. Остальные параметры аналогичны параметрам модуля, приведённым в табл. 2.

При проектировании и изготовлении данного модуля решена основная задача автоэмиссионных источников электронов — идентичность эмиссионных характеристик [209] при их серийном производстве.

Представленные выше разработки могут также применяться в перспективном направлении создания источников искусственного освещения, разработанных специально для выращивания растений с целью стимуляции их роста воздействием излучения волн электромагнитного спектра, благоприятных для фотосинтеза. Источники фитоактивного освещения используются как при полном отсутствии естественного света, так и при его недостатке.

Искусственный свет должен обеспечивать тот спектр электромагнитного излучения, который удовлетворял бы потребностям выращиваемых растений. Благоприятные для растений условия создаются не только подбором цветовой температуры света и его спектральных

характеристик, но и с помощью изменения интенсивности свечения ламп. Для разных видов растений и текущих стадий их развития необходимы различные спектр, световая отдача и цветовая температура источника света. В соответствии с естественными условиями растениям требуется чередование тёмных и светлых периодов, для чего система освещения должна быть оборудована контроллером, обеспечивающим возможность её периодического включения и выключения.

В качестве источников света для таких систем освещения в настоящее время используются лампы накаливания, люминесцентные, газоразрядные и индукционные лампы, а также светодиоды. До недавнего времени в первой (вегетативной) фазе роста растений применялись металлогалогенные лампы, излучающие достаточное количество синего света, способствующего росту зелёной массы. Во второй (репродуктивной) фазе использовались натриевые лампы высокого давления, поскольку их излучение имеет красноватый оттенок, способствующий цветению и образованию плодов. Однако всё чаще применяются люминесцентные лампы ввиду их больших эффективности и экономичности.

В последнее время на рынке начали появляться источники фитоактивного освещения на основе светодиодов. При сочетании светодиодов разных цветов получают системы освещения, эффективные как на стадии вегетации, так и в репродуктивный период. Так, Национальное агентство по авионавигации и исследованию космического пространства США (НАСА) уже провело успешные эксперименты по выращиванию пищевых растений в космосе с помощью светодиодных светильников [210].

В работе [211] рекомендуется использовать как оптимальное для роста и здоровья растений следующее соотношение между количеством светодиодов: 12 красных с длиной волны 660 нм, шесть оранжевых с длиной волны 612 нм и один синий с длиной волны 470 нм.

Широкие диапазоны спектра излучения и цветовой температуры, высокая световая отдача автоэмиссионных ламп, по сравнению с таковыми источников света других типов, позволяют использовать их для разных видов растений, принимая во внимание текущую стадию их развития.

Таким образом, преимущества и особенности автоэмиссионных ламп позволяют создавать современные фитосветильники, обладающие мощностью, исчисляемой как несколькими десятками, так и несколькими сотнями ватт, что делает их достойной альтернативой источникам света других типов. При этом будут удовлетворены потребности как индивидуальных пользователей, так и промышленных предприятий.

7.2. Ультрафиолетовые лампы

В последние годы в связи с проблемами глобальной экологической безопасности очень остро встаёт вопрос о замене излучающих в УФ-диапазоне ртутьсодержащих ламп, которые широко используются в медицине, а также при очистке воздуха в различных помещениях, для полимеризации красок и т.д. Экцимерные и дейтериевые лампы с экологической точки зрения также очень далеки от совершенства.

Первые попытки создания катодолюминесцентных УФ-ламп с автокатадами вызывают осторожный оптимизм в решении этой очень важной задачи.

Дополнительными особенностями таких ламп являются:

- 1) мгновенная готовность к работе (время включения менее 10^{-8} с);
- 2) возможность работы как в аналоговом, так и в импульсном режимах;
- 3) широкий температурный диапазон эксплуатации;
- 4) возможность получения УФ-излучения практически в любом фиксированном диапазоне, так как спектр излучения определяется только составом применяемого люминофора;

5) возможность изготовления ламп в широком диапазоне выходных мощностей с применением различных конструктивных решений (торцевые, плоские, сферические и т.д.);

6) экологическая чистота на всех этапах производства, эксплуатации и утилизации, так как в катодолюминесцентных УФ-лампах отсутствуют ртуть и другие вредные компоненты;

7) возможность осуществлять питание ламп от любого сетевого (220, 380 В) или бортового (12, 24 В) напряжения, а также от аккумуляторов и батарей.

Создание эффективных УФ-катодолюминесцентных ламп связано, прежде всего, с разработкой широкозонных катодолюминофорных материалов.

Смеси на основе оксидов, таких как BeO или MgZnO, имеют широкую запрещённую зону [212–216]. Однако BeO очень токсичен, а MgZnO чрезвычайно труден в производстве из-за различной структуры ZnO и MgO.

Фториды — это подающие большие надежды УФ-катодолюминесцентные материалы, так как они обладают чрезвычайно широкой запрещённой зоной [217–219]. Такие фториды, как, например, KMgF_3 или KCaF_3 [220], имеют излучение в диапазоне длин волн 140–200 нм. KMgF_3 обладает кубической структурой и не требует легирования редкоземельными элементами.

Конструкция УФ-плоской лампы с люминофором KMgF_3 описана в работах [221, 222]. В качестве выходного окна используется ориентированный кристалл MgF_2 , на который лазерным испарением наносится слой KMgF_3 . Площадь выходного окна 64 мм^2 . Мишень для испарения получают расплавлением KMgF_3 ($\text{KF}:\text{MgF}_2 = 1:1$) в атмосфере $\text{Ar}:\text{CF}_4$ (95:5) при температуре 1220°C . Полученная после плавления структура охлаждается в течение 1 ч до температуры 900°C и затем в течение 48 ч — до комнатной температуры.

Анод и вытягивающий электрод выполнены из медной сетки с ячейкой размером 0,1 мм, а спейсеры — из фторопласта толщиной 0,3 и 1 мм.

В качестве катодов используются конусные углеродные наноструктурированные автокатоды, выращенные на стеклоглеродной подложке бомбардировкой ионами Ag^+ при комнатной температуре [223, 224]. Плотность, длина и диаметр полученных микроострий около $5 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$, 0,3–2,0 мкм и 20 нм соответственно. Рабочее давление в камере равнялось 5×10^{-6} торр. Параметры системы: вытягивающее напряжение 800 В, ускоряющее напряжение 1800 В, ток 0,32 мкА; мощность УФ-излучения достигала 2 мВт. Спектр излучения самого KMgF_3 имеет максимум при длине волны 180 нм, а в системе с подложкой из MgF_2 на выходе даёт спектр с двумя пиками — на длинах волн 150 и 180 нм.

Для более длинных волн УФ-излучения целесообразно использовать более доступные и простые с техноло-

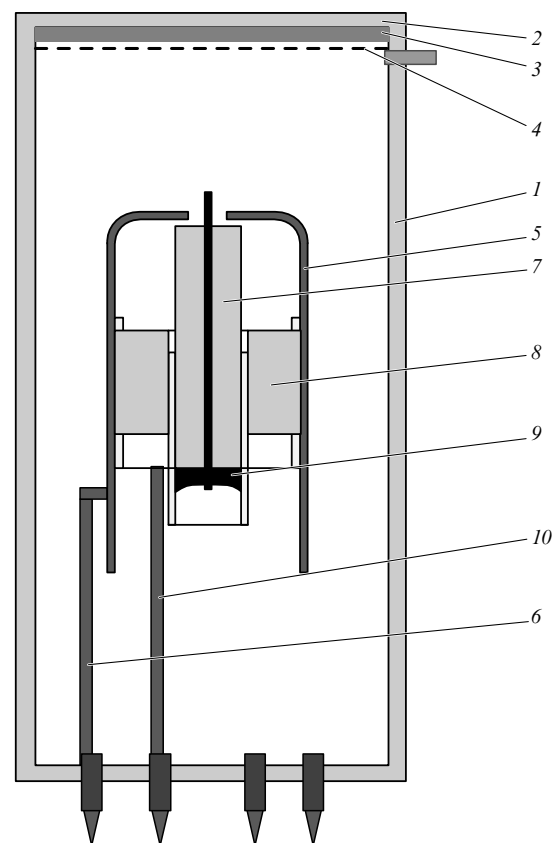


Рис. 19. Ультрафиолетовая лампа пальчикового типа: 1 — вакуумная колба из прозрачного для УФ-излучения диэлектрического материала, 2 — анод, 3 — УФ-люминофор, 4 — слой алюминия, 5 — модулятор, 6 — контактный вывод, 7 — автокатод из наноструктурированного углеродного материала, 8 — юстировочный диск, 9 — контактный узел, 10 — контактный вывод автокатада.

гической точки зрения материалы для выходных окон, такие как кварц или увиолевые стёкла. В [225] предложена конструкция простой УФ-лампы в диапазоне длин волн 220–350 нм. Конструкция такой лампы приведена на рис. 19.

Использование автокатада, выполненного из наноструктурированного углеродного материала, позволяет снизить пороговую напряжённость электрического поля для тока эмиссии ($1-5 \text{ В мкм}^{-1}$) и увеличить срок службы автокатада (50000 ч), что обеспечивает длительный срок службы лампы в целом. Время включения вакуумной УФ-лампы составляет не более 10^{-8} с, что означает практически мгновенную готовность лампы к работе. Спектр излучения люминесценции УФ-лампы зависит от химического состава люминофора, поэтому, изменяя его состав, выбирают спектр излучения в УФ-диапазоне, наиболее подходящий для конкретного применения, например, используя катодные люминофоры КЛ-УФ-315 и КЛ-УФ-300 в диапазоне длин волн менее 350 нм. Слой алюминия, нанесённый поверх люминофора, служит для увеличения интенсивности излучения, так как излучение от зёрен люминофора распространяется на угол 360° , а слой алюминия играет роль зеркала, отражающего свет во внешнюю часть лампы.

Ультрафиолетовая лампа представляет собой цилиндрическую вакуумную колбу из прозрачного для излучения диэлектрического материала с автокатодом, выпол-

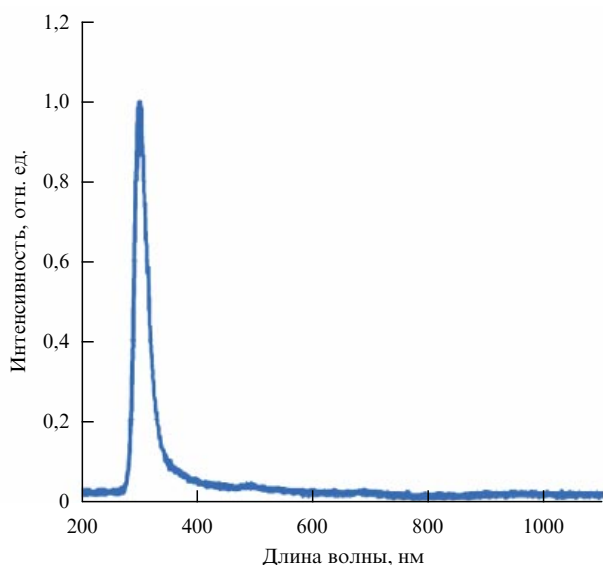


Рис. 20. Спектр излучения ультрафиолетовой лампы.

ненным из наноструктурированного углеродного материала, модулятором с отверстием для формирования пучка электронов, люминесцирующим экраном, анодом и контактными выводами. Для обеспечения соосности автокатод размещён в отверстии юстировочного диска, ориентированного соосно отверстию модулятора. Для увеличения контактирующей поверхности вывод автокатада может быть выполнен из электропроводного вещества, в частности аквадага, нанесённого на конец автокатада, и контактирующей с ним по боковой поверхности обечайки, с которой жёстко соединён контактный вывод. Люминесцирующий экран автоэмиссионной УФ-лампы покрыт слоем УФ-люминофора и алюминием, служащим для увеличения световой отдачи люминофора.

Технический результат, а именно эффективное преобразование электрической энергии в УФ-излучение, обеспечивается использованием специальных материалов автокатада и люминофора, способных в сочетании давать эффективное излучение в УФ-диапазоне спектра. Лампа обладает высокой энергетической эффективностью (не менее 15 %), длительной работоспособностью (50000 ч), мгновенной готовностью к работе, высокой устойчивостью к механическим вибрациям и колебаниям напряжения в сети и отличается отсутствием экологически вредных компонентов.

В зависимости от необходимой длины волны УФ-излучения могут применяться различные по химическому составу люминофоры [226–230]. Так, для диапазона порядка 300 нм можно применять хорошо зарекомендовавшие себя составы $\text{Bi}_n\text{Y}_m\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$. Спектр излучения УФ-лампы с одним из таких люминофоров представлен на рис. 20. Эффективность указанных люминофоров достаточно высока для практических применений: 27 мВт при общей мощности 900 мВт ($U = 8$ кВ, $J = 112$ мкА). Уменьшение длины волны УФ-излучения до 245–260 нм требует люминофора другого состава, например ZnAl_2O_4 [229, 230].

В разработке вакуумных катодолуминесцентных ламп с автокатадами сделаны первые шаги как в создании их конструкций, так и в поиске оптимального хи-

мического состава люминофоров. Поэтому следует ожидать всплеска работ в этом направлении в ближайшем будущем.

8. Заключение

Быстрое развитие технологий автоэлектронных катодов даёт уверенность в том, что в ближайшие годы катодолуминесцентные лампы освещения с автокатадами займут достойное место среди источников света, работающих на основе других физических принципов.

Это, в первую очередь, связано с очень высокой экологической безопасностью автоэмиссионных катодолуминесцентных ламп как в процессе их производства и эксплуатации, так и при их утилизации. Кроме того, при производстве таких ламп могут использоваться достаточно простые технологии и доступные широко распространённые материалы, а также в значительной мере производственные мощности существующих традиционных электроламповых заводов. Спектр излучения этих ламп может быть наиболее приближен к естественному солнечному свету, а наши технико-экономические оценки показывают достаточно высокую экономичность автокатодных люминесцентных ламп.

В выполненных за последние годы работах, связанных с созданием новых типов автоэмиссионных катодолуминесцентных ламп, можно условно выделить несколько основных направлений, среди которых следует отметить:

- поиск новых материалов, создание технологий их получения (в том числе наноматериалов и нанотехнологий на основе углерода) и конструирование на их основе современных эффективных автоэмиссионных электронных катодов [61, 63, 64, 231, 232];
- поиск и исследование эффективных люминофоров, включая изучение механизмов переноса энергии и генерации в них люминесценции под воздействием электронного пучка, в том числе с целью использования этих катодолуминесцентных в современных конструкциях источников света различного спектрального диапазона [62, 65, 68, 69, 231–237] (в частности, достигнута светоотдача [234] для зелёных люминофоров 55 лм Вт⁻¹, для голубых — 10 лм Вт⁻¹, для красных — 13 лм Вт⁻¹);
- разработка на основе новых материалов и новых технологий современных, в том числе микроминиатюрных, конструкций высокоэффективных катодолуминесцентных источников света различного назначения [54, 60, 232, 238]. В частности, в работе [232] для миниатюрных плоских источников зелёного света при использовании автокатадов на основе наноструктурированного углерода (однослойных углеродных нанотрубок — Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNT)) достигнута светоотдача более 60 лм Вт⁻¹.

Следует отметить, что наряду с развитием таких, уже ставших традиционными, направлений совершенствования технологий создания автоэлектронных катодов и анодов, покрытых люминофором, как поиск новых материалов и использование нанотехнологий для их формирования, по-прежнему остаются актуальными и задачи обеспечения длительной стабильной работы автоэмиссионных источников света за счёт специальной обработки поверхностей катода и анода и формирования в автоэмиссионном источнике света пространственной и временной структуры электромагнитных полей, обеспе-

чивающей увеличение равномерности потока электронов, необходимые фокусировку и интенсивность электронного пучка при воздействии на люминофор, а также снижение облучения автокатода потоком положительно заряженных частиц, образующихся при бомбардировке электронами покрытого люминофором анода. Решение этих задач имеет важное практическое значение при создании автокатодов и их применении в различных электронных устройствах.

Обеспечить качественный скачок в развитии автоэмиссионных технологий, в частности при создании катодолюминесцентных источников света, может только комплексное сочетание использования новых материалов, новых технологических приёмов и дальнейшего совершенствования традиционных физических подходов на основе более глубокого изучения процессов, лежащих в основе автоэмиссии и катодолюминесценции.

Значительная роль, по нашему мнению, в дальнейшем развитии автоэмиссионных и катодолюминесцентных технологий должна быть отведена исследованиям по определению влияния структуры, состава и методов получения и обработки автоэмиссионной и катодолюминесцентной поверхностей с целью повышения стабильности физических автоэмиссионных и катодолюминесцентных характеристик катода и анода при различных интенсивностях и поверхностных плотностях генерации электронного пучка на катоде и засветки им катодолюминофора на аноде.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность Н.Д. Кундиковой за обсуждения работы и высказанные ценные замечания, а также выражают благодарность рецензентам работы из журнала *Успехи физических наук*.

Список литературы

1. Айзенберг Ю Б (Ред.) *Справочная книга по светотехнике* (М.: Энергоатомиздат, 1983)
2. Шешин Е П *Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов* (М.: Изд-во МФТИ. Физматкнига, 2001)
3. Sheshin E P et al., in *7th Int. Vacuum Microelectronics Conf. Grenoble, France, 4–7 1994, Abstracts*, p. 423
4. Kireev V B, in *CEES Working Paper Vol. 134* (Princeton, NJ: The Center for Energy and Environment Studies, Princeton Univ., 1996) p. 11
5. Kireeva G I, Kireev V B, in *CEES Working Paper Vol. 135* (Princeton, NJ: The Center for Energy and Environment Studies, Princeton Univ., 1996) p. 13
6. Коссов В В, Лившиц В Н, Шахназаров А Г *Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция)* (М.: Экономика, 2000)
7. Виленский П Л, Лившиц В Н, Смоляк С А *Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика* (М.: Дело, 2008) с. 1103
8. Шешин Е П, Киреев В Б, в сб. *Рециклинг отходов. VIII Международная конф., Россия, Санкт-Петербург, 2011*, с. 29; Sheshin E P, Kireev V B, in *Waste Recycling. Catalogue VIII Intern. Conf., St.-Petersburg, Russia, 2011*, p. 29
9. Шешин Е П, Киреев В Б, в сб. *Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики. Труды 57-й конф. МФТИ* (М.: МФТИ, 2014) с. 21
10. Крюкова И В *Физические процессы в полупроводниковых импульсных лазерах с накачкой электронными пучками* (М.: МГТУ им. Баумана, 2009) с. 443
11. Левшин В Л и др. *Труды ФИАН* **23** 64 (1963)
12. Гугель Б М *Люминофоры для электровакуумной промышленности* (М.: Энергия, 1967)
13. Ozawa L *Cathodoluminescence and Photoluminescence: Theories and Practical Application* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2010)
14. Cees R (Ed.) *Luminescence. From Theory to Applications* (Weinheim: Wiley-VCH, 2008)
15. Алукер Э Д, Лусис Д Ю, Чернов С А *Электронные возбуждения и радиолюминесценция щелочно-галлоидных кристаллов* (Рига: Зинатне, 1979)
16. Васильев А Н, Михайлин В В *Введение в спектроскопию диэлектриков* (М.: Университетская книга, 2010)
17. Alig R C, Bloom S *Phys. Rev. Lett.* **35** 1522 (1975)
18. Чукова Ю П *Антистоксова люминесценция и новые возможности ее применения* (М.: Сов. радио, 1980)
19. Акимов И А, Черкасов Ю А, Черкашин М И *Сенсибилизированный фотоэффект* (М.: Наука, 1980)
20. Овсянкин В В, Феофилов П П *ЖПС* **7** 498 (1967)
21. Овсянкин В В, Феофилов П П *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **37** 262 (1973)
22. Овсянкин В В, Феофилов П П *ДАН СССР* **174** 787 (1967); Ovsyankin V V, Feofilov P P *Sov. Phys. Dokl.* **12** 573 (1967)
23. Овсянкин В В, Феофилов П П, в сб. *Спектроскопия кристаллов. Материалы симпозиума по спектроскопии кристаллов, содержащих редкоземельные элементы и элементы группы железа, Харьков, 9–14 октября 1967 г.* (Отв. ред. С В Грум-Гржимайло и др.) (М.: Наука, 1970)
24. Овсянкин В В, Феофилов П П *ФТТ* **17** 1075 (1975); Ovsyankin V V, Feofilov P P *Sov. Phys. Solid State* **17** 684 (1975)
25. Dexter D L *Phys. Rev.* **108** 630 (1957)
26. Huang X Y, Zhang Q Y *J. Appl. Phys.* **107** 063505 (2010)
27. Piper W W, DeLuca J A, Ham F S *J. Luminescence* **8** 344 (1974)
28. Sommerdijk J L, Bril A, de Jager A W *J. Luminescence* **8** 341 (1974)
29. Wegh R T et al. *Science* **283** 663 (1999)
30. Wei X T et al. *Appl. Phys. B* **108** 463 (2012)
31. Yim D K et al. *J. Nanosci. Nanotechnol.* **11** 8748 (2011)
32. Zhang Q Y, Yang C H, Pan Y X *Appl. Phys. Lett.* **90** 021107 (2007)
33. Zhou J et al. *Appl. Phys. Lett.* **95** 1101 (2009)
34. Feldman M et al., Patent US 20140268168 (2014)
35. Барашев П П *ЖЭТФ* **61** 2287 (1972); Barashev P P *Sov. Phys. JETP* **34** 1225 (1972)
36. Tsakanov V, Wiedemann H (Eds) *Brilliant Light in Life and Material Sciences* (Dordrecht: Springer, 2015)
37. Dwivedi Y, Zilio S J *Nanosci. Nanotechnol.* **14** 1578 (2014)
38. Herden B et al. *Chem. Phys. Lett.* **620** 29 (2015)
39. Huang X et al. *Nanomedicine* **2** 681 (2007)
40. Jia W et al. *Phys. Status Solidi* **2** 48 (2005)
41. Liang W *Adv. Mater. Res.* **815** 677 (2013)
42. Nagesha D et al. *Int. J. Nanomedicine* **2** 813 (2007)
43. Ordejón B et al. *J. Luminescence* **126** 779 (2007)
44. Shalapska T et al. *J. Phys. D Appl. Phys.* **43** 405404 (2010)
45. Singh V et al. *Spectrochim. Acta A* **139** 1 (2015)
46. Srivastava A M *J. Electrochem. Soc.* **143** 4113 (1996)
47. Tong L et al. *Angewandte Chem. Int. Ed.* **49** 3485 (2010)
48. Wang T et al. *Biomed. Opt. Express* **4** 584 (2013)
49. Yang Z et al. *J. Alloys Compounds* **308** 94 (2000)
50. Родный П А *Оптика и спектроскопия* **89** 609 (2000); Rodnyi P A *Opt. Spectrosc.* **89** 556 (2000)
51. Feldmann C et al. *J. Luminescence* **92** 245 (2001)
52. Meltzer R S, in *Phosphor Handbook* (Eds W M Yen, S Shionoya, H Yamamoto) (Boca Raton, FL: CRC Press, 2006) p. 507
53. Ozawa L, Hersh H N *Phys. Rev. Lett.* **36** 683 (1976)
54. Adamo G et al. *Phys. Rev. Lett.* **109** 217401 (2012)
55. Bischak C G et al. *Biophys. J.* **106** 402 (2013)
56. Cao M M et al. *J. Display Technol.* **7** 467 (2011)
57. Chiba A et al. *Opt. Mater.* **35** 1887 (2013)
58. Guo F et al. *Appl. Surf. Sci.* **270** 621 (2013)
59. Itoh M, Ozawa L *Annu. Rep. Prog. Chem. C Phys. Chem.* **102** 12 (2006)
60. Le Moal E et al. *Nano Lett.* **13** 4198 (2013)
61. Li C *Mater. Lett.* **115** 212 (2014)
62. Miyake A et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** 04EH11 (2014)
63. Nakahama K et al. *Phys. Status Solidi* (2015) in press

64. Obratsov A N, Kleshch V I, Smolnikova E A *Beilstein J. Nanotechnol.* **4** 493 (2013)
65. Ogorodnikov I N et al. *J. Luminescence* **158** 252 (2013)
66. Popov M et al. *Appl. Surf. Sci.* **215** 253 (2003)
67. Sugita A et al. *Opt. Mater. Express* **4** 155 (2013)
68. Wallace M K, Diaz A L *J. Luminescence* **161** 403 (2015)
69. Yan J et al. *Opt. Mater.* **43** 59 (2015)
70. Ye Y, Guo T, Jiang Y *J. Semicond.* **33** 043003 (2012)
71. Young E C et al. *J. Cryst. Growth* **425** 389 (2015)
72. Озол Д И, в сб. *Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук области физики. Труды 57-й конф. МФТИ* (М.: МФТИ, 2014) с. 25
73. Шешин Е П, Киреев В Б *Энергополус* (5) 30 (2011)
74. Киреев В Б, Чадаев Н Н, Шешин Е П *Светотехника* (1) 10 (2012)
75. Richard N H et al., Patent US 20100097004 A1 (2010)
76. Richard N H et al., Patent US 20130043790 A1 (2013)
77. Бондаренко Б В и др., Patent SU 1306397 A1 (1985)
78. Бондаренко Б В и др., Patent SU 1417708 A (1986)
79. Батурич А С и др., Patent RU 2180145 (2005)
80. Гордеев С К и др., Patent RU 80994 U1 (2009)
81. Lim S H et al., Patent KR 1020010025503 (2002)
82. Yuan-Chao Y et al., Patent US 20080018227 A1 (2008)
83. Yuan-Chao Y et al., Patent US 20080007153 A1 (2008)
84. Ming-jie Z, Tao L, Wenbo M, Patent CN 102347204 A (2012)
85. Yuan-Chao Y et al., Patent US 20080012466 A1 (2008)
86. Yuan-Chao Y et al., Patent US 20080030123 A1 (2008)
87. Choi K S, Lee S J, Kim J M, in *12th Intern. Vacuum Microelectronics Conf., IVMC, Darmstadt, Germany, 6–9 July 1999*
88. Wen-Chun W et al., in *IEEE VMC, Univ. of California, California, 2001*
89. Yang D L et al. *Appl. Surf. Sci.* **254** 513 (2007)
90. Yong-Jun J et al., in *Proc. of the Intern. Vacuum Nanoelectronics Conf., IVNC'2005, Oxford, UK, 2005*, p. 202
91. Kaftanov V S, Suvorov A L, Sheshin E P, Patent US 5588893 (1995)
92. Kaftanov V S, Suvorov A L, Sheshin E P, Patent WO96/25753 (1995)
93. Kaftanov V S, Suvorov A L, Sheshin E P, Patent SW504603 (1995)
94. Kaftanov V S, Suvorov A L, Sheshin E P, Patent US 5973446 (1999)
95. Forsberg G, Andersson C-H, Patent WO0077813 A1 (2000)
96. Шаров В Б, Шешин Е П, Шука А А *Нано- и микросистемная техника* (3) 17 (2005)
97. Ying L, Wenbo M, Mingjie Z, Patent CN 101728151 (2012)
98. Zhou M, Ma W, Li Q, Patent WO 201237733 (2012)
99. Kang H W et al. *J. Phys. Chem. C* **115** 11435 (2011)
100. Li Q et al., Patent US 2007222364 (2010)
101. Nalin K, Chenggang X, Patent US 6573643 (2003)
102. Kuei-Wen C, Shie-Heng L, Chun-Yen H, Patent US 20080079348 (2008)
103. Yuge R et al., Patent JP 2009076314 (2009)
104. Okawa T, Patent JP 2009187934 (2009)
105. Okawa T, Patent JP 2009054372 (2009)
106. Li Q et al., Patent US 7843121 (2010)
107. Wu H C et al. *Appl. Surf. Sci.* **50** 4781 (2012)
108. Haba H et al., Patent JP 2007227077 A (2007)
109. Hayashida Y, Koga K, Patent JP 2009081017 (2009)
110. Peng L et al., Patent US 20110285271 (2011)
111. Hatai T, Ichihara T, Patent JP 2011175800 (2011)
112. Tzung-Han Y, Chi-Tsung L, Patent US 20120153808 (2012)
113. Norikane T et al., Patent JP 2002170487 A (2002)
114. Gamo S, Tsujii M, Takayanagi K, Patent JP 2011210439 (2011)
115. Haba H, Patent JP 2006190544 A (2007)
116. Chen F, Peng L, Shou-Shan F, Patent US 7821192 (2010)
117. Ga-Lane C, Patent US 7290916 (2006)
118. Ga-Lane C, Patent US 7446446 (2006)
119. Mingjie Z, Wenbo M, Patent US 20120248965 A1 (2012)
120. Jiang N, Patent CN 101042980 A (2007)
121. Cai-Lin G et al., Patent US 7812513 (2007)
122. Fu C L, Patent CN 101026060 (2007)
123. Michalski H, Partner P, Patent WO 2012022023 (2012)
124. Liang L et al., Patent US 7872408 (2008)
125. Haba H, Patent JP 2006190540 (2006)
126. Zhenzhang C, Zonghan C, Zhiche G, Patent CN 102620198 (2014)
127. Lin M H et al., Patent US 2007035230 A1 (2007)
128. Woo-Hu T, Ming-Chung F, Jung-Chen C, Patent US 20080036361 (2008)
129. Jun H C et al., Patent US 20050179363 (2005)
130. Tailiang G et al., Patent CN 10189915 (2010)
131. Tailiang G et al., Patent CN 101866818 (2010)
132. Jiji A, You Q *Nanotechnology* **18** 295703 (2007)
133. Pan D H, Fan F G, Patent US 20090302738 A1 (2009)
134. Kim K B et al., Patent KR 20110064787 (2011)
135. Pan D H, Patent US 20090224680 (2009)
136. Hiraki H, Harazono H, Patent JP 2008288157 (2008)
137. Haba H, Patent JP 2006190539 (2006)
138. Haba H, Patent JP 2006252782 (2006)
139. Chen P J et al., Patent US 2006022574 (2006)
140. Gamo S, Nanba A, Arakawa T, Patent JP 2010086792 A (2010)
141. Jin W J et al., Patent US 20110148310 (2011)
142. Jeong J W, Song Y H, Kim D J, Patent WO 200931755 (2009)
143. Par S et al., Patent KR 1020070099268 A (2007)
144. Nakamura K, Patent JP 2011065810 (2011)
145. Kojima T, Patent JP 2011071034 (2011)
146. Kobayashi A, Fujita T, Patent JP 2011108563 (2011)
147. Li Y Y et al., Patent US 20130015778 (2013)
148. Lin F C, Patent US 2008297026 (2008)
149. Haba H, Ko M, O K Patent JP 2008204641 A (2008)
150. Nihei F, Patent JP 2010212004 (2010)
151. Kang H S et al., Patent US 20090167150 (2009)
152. Kang H S et al., Patent KR 20090072535 A (2009)
153. Hyun S, Byong G, Patent US 20110227960 A1 (2011)
154. Inaoka H et al., Patent JP 2008269870 (2008)
155. Jeng J W, Patent US 20070018559 (2007)
156. Chen Z H et al. *Adv. Funct. Mater.* **18** 3063 (2008)
157. Kaftanov V S et al., Patent US 5877558 (1999)
158. Kaftanov V S et al., Patent US 6008575 (1999)
159. Sheshin E P et al., Patent CA 2293269 (2003)
160. Blyablin A A et al., in *12th Intern. Vacuum Microelectronics Conf., IVMC, Darmstadt, Germany, 6–9 July 1999, Technical Digest*, p. 346
161. Bonard J M et al. *Appl. Phys. Lett.* **78** 2775 (2001)
162. Zhang X X et al., in *Intern. Vacuum Nanoelectronics Conf., IVNC'2005, Oxford, UK, 2005, Technical Digest*, p. 342
163. Huang J X et al., in *Intern. Vacuum Nanoelectronics Conf., IVNC'2005, Oxford, UK, 2005, Technical Digest*, p. 284
164. Kjellman J, Lindmark M, Patent US 6873095 (2005)
165. Obratsov A N et al. *Appl. Surf. Sci.* **215** 214 (2003)
166. Obratsov A N, Patent US 20050174059 (2005)
167. Nishimura K, Sasaoka H, Ooka M, Patent JP 2012142109 (2010)
168. Hu Q H, Patent EP 2472552 (2012)
169. Yang T H, Dai B D, Patent US 20110025188 A1 (2011)
170. Qian L et al., Patent US 20070228919 (2007)
171. Wei Y, Liu L, Fan S S, Patent US 20100201252 (2010)
172. Hu Q H, Patent EP 2339610 (2011)
173. Nishimura K, Sasaoka H, Ooka M, Patent WO 201249975 (2012)
174. Cheng W H et al., Patent US 2011004397 (2011)
175. Hu Q N, Patent EP 17739724 (2007)
176. Leychenko A S et al., in *19th Intern. Vacuum Nanoelectronics Conf., 50th Intern. Field Emission Symp. IVNC/IFES 2006, Guilin, China, 17–20 July 2006, Technical Digest*, p. 383
177. Лейченко А С и др., в сб. *Современное телевидение. 14-я Всероссийская научно-техническая конф., 14–15 марта 2006 г., Москва, Россия. Тезисы докладов* (М.: ФГУП МКБ Электрон, 2006) с. 30
178. Fu W Q et al., Patent US 11945538 (2009)
179. Zhou M, Ma W, Li Q, Patent US 13821512 (2013)
180. Qian L et al., Patent US 11603628 (2006)
181. Liu P et al., Patent US 11256727 (2005)
182. Wei Y et al., Patent US 7355329 (2008)
183. Forsberg G, Patent US 09731737 (2002)
184. Qiuhong H U, Patent CN 200580003494 (2007)
185. Yang T H, Patent US 13064745 (2011)
186. Yang T H, Patent US 13064744 (2011)
187. Hiraki A, Hiraki H, Patent JP 2009000231483 (2011)
188. Warm D, Patent CN 202733583 (2013)
189. Костиков В Г, Никитин И Е *Источники электропитания высокого напряжения РЭА* (М.: Радио и связь, 1986) с. 200

190. Бондаренко Б В, Черепанов А Ю, Шешин Е П *ПТЭ* (1) 206 (1986)
191. Купрашкин А С, Шаховской А Г, Шешин Е П *ПТЭ* (4) 238 (1991)
192. Басовский В Ф и др. *Устройства электропитания электронной аппаратуры* (Под ред. В Ф Басовского) (Киев: Техника, 1980)
193. Шешин Е П, Кузнецов В А, Patent SU 610081 (1978)
194. Браверман И Я и др., Patent SU 1508866 (1980)
195. Kawase T, Koga K, Patent US 20040004588 (2004)
196. Huang J C et al., Patent TW 273535 (1996)
197. Moerk G, Tiren J, Patent W 02013098239 (2011)
198. Hu Q H, Patent EP 2337432 (2011)
199. Lin J C, Patent TW 201218868 (2012)
200. Namba A, Anzawa S, Patent EP 2355736 (2011)
201. Стребков Д Си др., Патент РФ 2505744 (2014)
202. Young C S et al. *Nanotechnology* **19** 235306 (2008)
203. Батурин А С и др., в сб. *Современное телевидение. 9-я научно-техническая конф., 20–21 марта 2001 г., Москва, Россия. Тезисы докладов* (М.: МКБ Электрон, 2001) с. 21
204. Baturin A Set al., in *Displays and Vacuum Electronics. Proc., May 4, 2004, Gamische-Partenkirchen, Germany* (Berlin, 2004) p. 321
205. Gorog J, Rirt P M, Patent WO 2008002321 (2008)
206. Лешуков М Ю, Чадаев Н Н, Шешин Е П, в сб. *Современное телевидение. 13-я научно-техническая конф., 15–16 марта 2005 г., Москва, Россия. Труды конф.* (М.: ФГУП МКБ Электрон, 2005) с. 37
207. Лешуков М Ю и др., в сб. *Современное телевидение. 10-я научно-техническая конф., 19–20 марта 2002 г., Москва, Россия. Материалы конф.* (М.: МКБ Электрон, 2002) с. 30
208. Абаньшин Н и др. *Электронные компоненты* (4) 114 (2007)
209. Труфанов А И и др. *Микросистемная техника* (3) 32 (2004)
210. Anderson W G (Jr.), Capen L S, Patent US 6921182 B2 (2005)
211. Massa G D et al. *Grav. Space Res.* **19** (2) 19 (2006)
212. Duley W W *Opt. Commun.* **51** 160 (1984)
213. Choopun S et al. *Appl. Phys. Lett.* **80** 1529 (2002)
214. Zhu H et al. *Appl. Phys. Lett.* **99** 101110 (2011)
215. Ni P-N et al. *Opt. Lett.* **37** 1558 (2012)
216. Ni P-N et al. *Appl. Phys. Lett.* **104** 032107 (2014)
217. El Ouenzerfi R et al. *Appl. Phys. Lett.* **96** 7655 (2004)
218. Nishimatsu T et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** L365 (2002)
219. Sarakura N et al. *Opt. Mater* **30** 15 (2007)
220. Jansons J L et al. *Solid State Commun.* **67** 183 (1988)
221. Ono S et al., Patent W 0201127881 (2011)
222. Yanagihara M et al. *APL Mater.* **2** 046110 (2014)
223. Tanemura M et al. *Appl. Phys. Lett.* **86** 113107 (2005)
224. Che R C, Peng L-M, Wang M S *Appl. Phys. Lett.* **85** 4753 (2004)
225. Бланк В Д и др., Патент РФ 2529014 (2010)
226. Ехменина И В, Шешин Е П, Чадаев Н Н *Нано- и микросистемная техника* (2) 39 (2010)
227. Ехменина И В, Шешин Е П, Чадаев Н Н *Нано- и микросистемная техника* (4) 45 (2010)
228. Ехменина И В, Шешин Е П, Чадаев Н Н *Вестн. СПбГУ. Сер. 10. Прикл. матем. информ. проц. упр.* (1) 3 (2011)
229. Ехменина И В, Шешин Е Н *Труды МФТИ* **5** (1) 36 (2013)
230. Ехменина И В, Шешин Е П *Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технол.* **56** (5) 74 (2013)
231. Cao M M, Chacon R J, Hunt C E *J. Display Technol.* **7** 467 (2011)
232. Bahena-Garrido S et al. *Rev. Sci. Instrum.* **85** 104704 (2014)
233. Psuja P, Hreniak D, Strek W *J. Rare Earths* **27** 574 (2009)
234. Chubun N N, Chakhovskoi A G, Hunt C E *J. Vacuum Sci. Technol.* **21** 1618 (2003)
235. Заморянская М В "Катодолюминесценция широкозонных материалов и наногетероструктур на их основе", Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук (СПб.: СПбГУ, 2012)
236. Psuja P, Strek W *J. Rare Earths* **30** 627 (2012)
237. Kitaura M, Tanaka S, Itoh M *J. Luminescence* **158** 226 (2015)
238. Li J-Y et al. *Appl. Phys. Lett.* **94** 091501 (2009)

Cathodoluminescent light sources: status and prospects

A.S. Bugaev, V.B. Kireev, E.P. Sheshin, A.Yu. Kolodyazhnyj

Moscow Institute of Physics and Technology (State University),

Institutskii per. 9, 141700 Dolgoprudnyi, Moscow region, Russian Federation

E-mail: bugaev@cplire.ru, kireevvikt@yandex.ru, sheshin.ep@mipt.ru, kolodyazhnyj@gmail.com

A possible and feasible alternative to the current energy-saving light sources are environmentally friendly new-generation cathodoluminescent light sources (CLS) based on luminescence produced by electrons emitted from the field emission cathode. Because of the lack of available optimally designed general-purpose cathode field-emission lamps, the development of an efficient prototype CLS of potentially low mass production cost is currently the top priority.

Keywords: field emission, field emission properties of materials, field emission cathodes, carbon, carbon fibers, cathodoluminescence, light sources, efficiency of light sources

PACS numbers: 42.72.Bj, 85.60.Jb, 88.05.Tg

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201508e.0853

Bibliography — 238 references

Received 24 February 2015, revised 12 May 2015

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (8) 853–883 (2015)

Physics–Uspekhi **58** (8) (2015)