

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Р.Р. ШИРИЕВ

ПЛАЗМЕННЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИСТОЧНИКИ
ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Казань 2018

УДК 628.9
ББК 31.294
Ш64

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» *В.И. Курт*;

кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» *А.Н. Борисов*

Ш64 **Шириев Р.Р.**

Плазменные и полупроводниковые источники излучения оптического диапазона: учебное пособие / Р.Р. Шириев. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – 136 с.

В учебном пособии приведены классификация, описание конструкции и принципы работы электрических и неэлектрических плазменных и полупроводниковых источников излучения оптического диапазона естественного и антропогенного происхождения. Приведен сравнительный анализ технических характеристик источников света, отмечены преимущества и недостатки их использования.

Пособие предназначено для студентов академического и прикладного бакалавриата направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», изучающих дисциплины «Плазменные и полупроводниковые источники оптического диапазона», «Осветительные установки», «Узлы и компоненты приборов фотоники и квантовой электроники», а также может быть использовано при выполнении выпускных квалификационных работ.

УДК 628.9
ББК 31.294

ПРЕДИСЛОВИЕ

Источники оптического излучения востребованы во всех областях человеческой деятельности – в быту, на производстве, в научно-исследовательской деятельности. В зависимости от той или иной области применения к источникам оптического излучения предъявляются разные технические и экономические требования. В настоящее время существует около 2000 видов источников оптического излучения, они делятся на естественные и искусственные источники. Естественные источники – это природные материальные объекты, главным свойством которых является способность испускать видимый свет. В свою очередь, искусственные источники являются техническими устройствами различной конструкции и отличаются различными способами преобразования энергии. Все источники классифицируются по размеру, по характеру распределения силы излучения в пространстве, по спектральному распределению потока излучения, по времени действия излучения и по цветовой температуре.

История светотехники корнями упирается в научные труды всемирно известных ученых прошлых столетий: Уильям Крукс, Ирвинг Ленгмюр, Джон Уокер, Гийом Бертран Карсель, Томас Иоганн Зеебек, Жан Шарль Атаназ Пельтье, Ханс Кристиан Эрстед, Жан Батист Жозеф Фурье, Филипп Лебон, Карл Ауэр Велсбах, Густав Генрих Видеман, Александр Эдмон Беккерель, Генрих Гейслер, Никола Тесла и многих других малоизвестных, но не менее важных с исторической точки зрения.

В современной истории на рубеже XX-XI вв. следует отметить научные труды таких ученых, как Питер Купер Хьюитт, Эдмунд Гермер, Сергей Иванович Вавилов, Лёвшин Вадим Леонидович, Мария Александровна Константинова-Шлезингер и др.

Из современников, внесших неоценимый вклад в современную светотехнику, можно отметить ученых с мировым именем: Юлиан Борисович Айзенберг, Глеб Михайлович Кнорринг, Валентин Александрович Фабрикант, Александр Иванович Ларюшин.

Областью научных изысканий ученых многих вузов и организаций в той или иной степени является светотехника.

Целью написания учебного пособия является обобщение и доведение до студентов современных знаний в области генерирования оптического излучения и подготовки их к выбору плазменных и полупроводниковых

источников излучения оптического диапазона для решения задач освещения, сигнализации, передачи и приема информации, обработки материалов и изделий, для решения медицинских и санитарных задач, а также применения их в промышленности.

В пособии приведены общие сведения о различных типах источников излучения с указанием их областей применения, перечислением основных преимуществ и недостатков. Оно состоит из четырех разделов. В первом разделе приводится обзор естественных и первых искусственных неэлектрических плазменных источников излучения оптического диапазона. Во втором разделе описаны основные электрические плазменные источники излучения оптического диапазона. В третьем разделе – полупроводниковые источники излучения оптического диапазона. В четвертом разделе приведено сравнение источников излучения оптического диапазона по некоторым параметрам.

Представленный в учебном пособии материал направлен на формирование у студентов способности учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности, способности строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения; способности аргументировать, выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения; способности выполнять работы по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники.

Учебное пособие может быть полезным при изучении таких учебных дисциплин, как «Плазменные и полупроводниковые источники оптического диапазона», «Узлы и компоненты приборов фотоники и квантовой электроники», а также для того, чтобы на основании терминов, понятий и ключевых слов обучающийся смог найти более подробную информацию из других литературных источников.

ВВЕДЕНИЕ

Поскольку пособие посвящено устройству и принципам действия плазменных и полупроводниковых источников электромагнитного излучения оптического диапазона, необходимо уяснить основополагающие термины, такие как: «плазма», «полупроводник», «источник излучения оптического диапазона».

Плазма в переводе с греческого языка $\pi\lambda\acute{\alpha}\sigma\mu\alpha$ означает «вылепленное», «оформленное», представляет собой ионизованный квазинейтральный газ.

Полупроводники – материалы, по своей удельной проводимости, занимающие промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличающиеся от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения. К полупроводниковым источникам излучения оптического диапазона относятся светодиоды и полупроводниковые лазеры.

Так называемый оптический диапазон спектра составляют электромагнитные волны с длиной волн λ от 1 мм до 1 нм. Внутри оптического диапазона различают:

- инфракрасное излучение с длиной волны $\lambda = 0,78\text{--}1000$ мкм;
- видимый свет с $\lambda = 0,38\text{--}0,78$ мкм;
- ультрафиолетовое излучение с $\lambda = 0,0001\text{--}0,38$ мкм.

Оптические свойства веществ в инфракрасном излучении значительно отличаются от их свойств в видимом излучении. Например, слой воды в несколько сантиметров непрозрачен для инфракрасного излучения с $\lambda = 1$ мкм. Инфракрасное излучение составляет большую часть излучения ламп накаливания, газоразрядных ламп, около 50 % излучения Солнца; инфракрасное излучение испускают некоторые лазеры. Для его регистрации пользуются тепловыми и фотоэлектрическими приемниками и фотоматериалами.

Весь диапазон инфракрасного излучения условно делят на три области:

- ближняя: $\lambda = 0,74\text{--}2,5$ мкм;
- средняя: $\lambda = 2,5\text{--}50$ мкм;
- далекая: $\lambda = 50\text{--}2000$ мкм.

Инфракрасное излучение также называют «тепловым излучением», так как инфракрасное излучение от нагретых предметов воспринимается кожей человека как ощущение тепла. При этом длины волн, излучаемые телом, зависят от температуры нагревания: чем выше температура, тем короче длина волны и выше интенсивность излучения. Спектр излучения

абсолютно черного тела при относительно невысоких (до нескольких тысяч Кельвинов) температурах лежит в основном именно в этом диапазоне. Инфракрасное излучение испускают возбужденные атомы или ионы.

Свет обеспечивает человеку способность видеть, и зрение позволяет людям получать не менее 80 % информации о внешнем мире и ориентироваться в сложной обстановке повседневной жизни.

Любой объект становится видимым при наблюдении хотя бы одного из двух следующих условий:

1) объект должен быть первичным источником света, как, например, звезда, свеча или электрическая лампа;

2) объект должен быть вторичным источником света, то есть должен отражать падающий на него свет от какого-нибудь источника.

Источники оптического излучения подразделяются на две большие группы – естественные и искусственные источники оптического излучения.

Естественные источники оптического излучения – это природные объекты и явления, обладающие способностью испускать оптические излучения. Искусственные источники оптического излучения, в отличие от естественных источников, являются продуктом производства человека. Они могут быть электрическими или неэлектрическими. Многие тысячелетия жилище человека освещали такие искусственные источники света, как костер, факел, жировик, лучина, свеча, керосиновые и газовые лампы. С прошлого века электрические источники оптического излучения получили широкое распространение. Принцип действия большинства из них основан на использовании плазменного состояния вещества, теплоемкого и нестабильного в земных условиях. Плазменное состояние вещества можно получить посредством электрического разряда в газообразной среде. При этом электромагнитное излучение такого источника будет выходить далеко за пределы видимого диапазона, что пагубно сказывается на коэффициенте полезного действия, светоотдаче и безопасности для биологических объектов. С позиций стабильности, надежности и теплоемкости полупроводниковые источники оптического диапазона имеют выгодные отличия от плазменных источников.

1. НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ПРИРОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

1.1. Четвертое состояние вещества

Плазма – это ионизованный квазинейтральный газ. *Ионизация* – это эндотермический процесс образования ионов из нейтральных атомов или молекул. Положительно заряженный ион образуется, если электрон в молекуле получает достаточную энергию для преодоления потенциального барьера, равную ионизационному потенциалу. Отрицательно заряженный ион, наоборот, образуется при захвате дополнительного электрона атомом с высвобождением энергии.

Эндотермические реакции (от древнегреческого ἔνδον – внутри и θερμῆ – тепло) – это химические реакции, сопровождающиеся поглощением теплоты, таким образом, продукты реакции содержат больше энергии, чем исходные компоненты.

К эндотермическим реакциям относятся:

- восстановление металлов из оксидов – процесс присоединения электронов атомом вещества, при этом его степень окисления понижается;

- электролиз – физико-химический процесс, состоящий в выделении на электродах составных частей растворенных веществ или других веществ, являющихся результатом вторичных реакций на электродах, который возникает при прохождении электрического тока через раствор, либо расплав электролита (поглощается электрическая энергия);

- электролитическая диссоциация – процесс распада электролита (проводника второго рода – вещества, хорошо проводящего электрический ток, электропроводность которого обусловлена подвижностью положительно или отрицательно заряженных ионов) на ионы при его растворении или плавлении (например, растворение солей в воде);

- ионизация – процесс образования ионов (частиц, в которых общее число протонов не эквивалентно общему числу электронов) из нейтральных атомов или молекул;

- фотосинтез – процесс преобразования энергии света в энергию химических связей органических веществ на свету фотоавтотрофами при участии фотосинтетических пигментов (хлорофилл у растений, бактериохлорофилл и бактериородопсин у бактерий).

Ионизованный газ содержит свободные электроны, а также положительные и отрицательные ионы. В более широком смысле, плазма может состоять из любых заряженных частиц (например, кварк-глюонная плазма).

Квазинейтральность означает, что суммарный заряд в любом малом по сравнению с размерами системы объеме равен нулю, является ее ключевым отличием от других систем, содержащих заряженные частицы (например, электронные или ионные пучки). Поскольку при нагреве газа до достаточно высоких температур он переходит в плазму, она называется четвертым (после твердого, жидкого и газообразного) агрегатным состоянием вещества.

Поскольку частицы в газе обладают подвижностью, плазма обладает способностью проводить электрический ток. В стационарном случае плазма экранирует постоянное внешнее по отношению к ней электрическое поле за счет пространственного разделения зарядов. Однако из-за наличия ненулевой температуры заряженных частиц существует минимальный масштаб, на расстояниях меньше которого квазинейтральность нарушается.

Четвертое состояние вещества было открыто У. Круксом в 1879 г. и названо «плазмой» И. Ленгмюром в 1928 г.

Уильям Крукс – это английский химик и физик, член (с 1863 г.) и президент (1913–1915 гг.) Лондонского Королевского общества – аналога Академии наук. «Лондонское королевское общество по развитию знаний о природе», в просторечии «Королевское общество» (в переводе с английского языка – *The Royal Society of London for the Improvement of Natural Knowledge*) – ведущее научное общество Великобритании, одно из старейших научных обществ в мире; создано в 1660 г. и утверждено Королевской хартией в 1662 г., от которого он в 1875 г. получил Королевскую золотую медаль. В числе других его наград – медали от Французской академии наук (1880 г.), Дэви (1888 г.) и медаль Копли (1904 г.) – высшая награда Королевского общества Великобритании. В 1897 г. королева Виктория пожаловала ему рыцарское звание. В 1910 г. он получил «Орден заслуг». Уильям Крукс вошел в историю как человек, открывший таллий и впервые получивший гелий в лабораторных условиях [1].

Ирвинг Ленгмюр (от английского *Irving Langmuir*) – это американский химик, лауреат Нобелевской премии по химии в 1932 г. «за открытия и исследования в области химии поверхностных явлений».

По сегодняшним представлениям, фазовым состоянием большей части барионного вещества (по массе около 99,9 %) во Вселенной является плазма. Все звезды состоят из плазмы, и даже пространство между ними заполнено плазмой, хотя и очень разреженной. К примеру, планета Юпитер сосредоточила в себе практически все вещество Солнечной системы, находящееся в «неплазменном» состоянии (жидком, твердом

и газообразном). При этом масса Юпитера составляет всего лишь около 0,1 % массы Солнечной системы, а объем – и того меньше: всего 10^{-15} %. При этом мельчайшие частицы пыли, заполняющие космическое пространство и несущие на себе определенный электрический заряд, в совокупности могут быть рассмотрены как плазма, состоящая из сверхтяжелых заряженных ионов.

Наиболее типичные формы плазмы:

1) *космическая и астрофизическая плазма:*

- Солнце и другие звезды,
- солнечный ветер,
- космическое пространство (пространство между планетами, звездами и галактиками),
- межзвездные туманности;

2) *земная природная плазма:*

- молния,
- огни святого Эльма,
- ионосфера,
- северное сияние,
- пламя (низкотемпературная плазма);

3) *искусственно созданная плазма:*

- вещество внутри люминесцентных и неоновых ламп,
- плазменные ракетные двигатели,
- газоразрядная корона озонового генератора,
- исследования управляемого термоядерного синтеза,
- электрическая дуга в дуговой лампе и в дуговой сварке,
- плазменная лампа,
- дуговой разряд от трансформатора Теслы,
- воздействие на вещество лазерным излучением,
- светящаяся сфера ядерного взрыва.

1.2. Естественные источники излучения оптического диапазона

Естественными или природными источниками излучения оптического диапазона принято считать:

1. Солнце, кометы, звезды и иные космические объекты.
2. Отраженный свет луны и планет.
3. Полярные сияния на Земле.
4. Атмосферные электрические разряды.

5. Биолюминесценция живых организмов.

6. Свечение окисляющихся органических продуктов и минералов и прочее.

К естественным источникам света космического масштаба относятся Солнце, отраженный свет луны и планет, кометы, звезды и иные космические объекты. Из перечисленных естественных источников света первостепенную роль в поддержании жизни на Земле играет солнечное излучение. Оно несёт живым существам свет и тепло. Солнечное излучение необходимо для осуществления фотосинтеза, жизнедеятельности живых существ, определяет макроклимат и микроклимат в пространстве существования биоты. В частности, растения, используя энергию Солнца посредством фотосинтеза, синтезируют органические соединения с выделением кислорода. Путём фотосинтеза была в далеком прошлом получена и запасена энергия в нефти, каменном угле и других видах ископаемого топлива.

Солнце представляет собой плазменный шар с эффективной температурой поверхности 5778 К. Благодаря такой температуре Солнце светит почти белым светом (рис. 1.1). Видимая область излучения абсолютно черного тела принята за эталон белого цвета. Свет небосвода принимают за эталон с максимальным значением коэффициента цветопередачи.

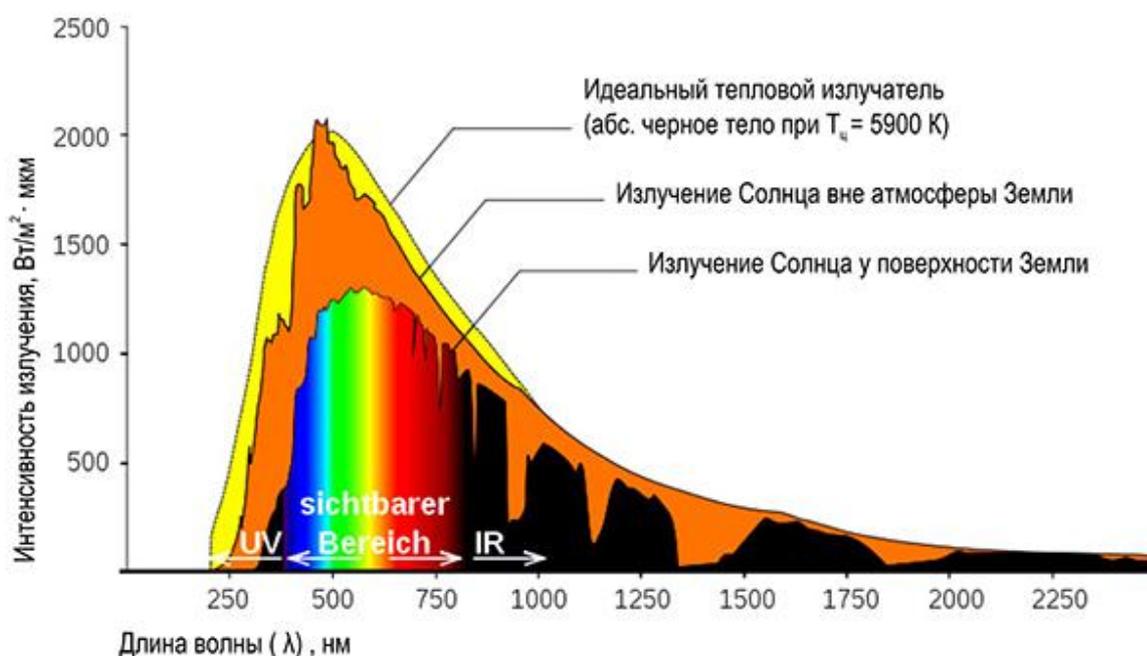


Рис. 1.1. Спектр излучения Солнца

В сопоставительном плане, освещенность на уровне Земли в солнечный летний полдень составляет 100000 лк, при полной луне в безоблачную ночь – 0,2 лк, а в безлунную звездную ночь – 0,002 лк.

В доисторических и античных культурах Солнце почиталось как божество. В Древнем Египте солнечным божеством являлся Ра. У греков богом Солнца был Гелиос, который, по преданию, ежедневно проезжал по небу на своей колеснице. Многие древние памятники связаны с Солнцем: например, мегалиты точно отмечают положение летнего солнцестояния. Одни из крупнейших мегалитов такого рода находятся в Набта-Плайа (Египет) и в Стоунхендже (Англия). Пирамиды в Чичен-Ице (Мексика) построены таким образом, чтобы тень от Земли скользила по пирамиде в дни весеннего и осеннего равноденствий.

Одним из первых попытался взглянуть с научной точки зрения на природу Солнца греческий философ Анаксагор (*Anaxagoras*) из Клазомен (жил в 500–428 гг. до н.э.). Он говорил, что Солнце – это не колесница Гелиоса, как учила греческая мифология, а гигантский, «размерами больше, чем Пелопоннес», раскаленный металлический шар. За это еретическое учение он был брошен в тюрьму, приговорён к смерти и освобожден только благодаря вмешательству Перикла.

Комета (от древнегреческого κομητης, *komytes* – волосатый, косматый) – небольшое небесное тело, обращающееся вокруг Солнца по коническому сечению с весьма растянутой орбитой. При приближении к Солнцу комета образует кому и иногда хвост из газа и пыли (рис. 1.2).

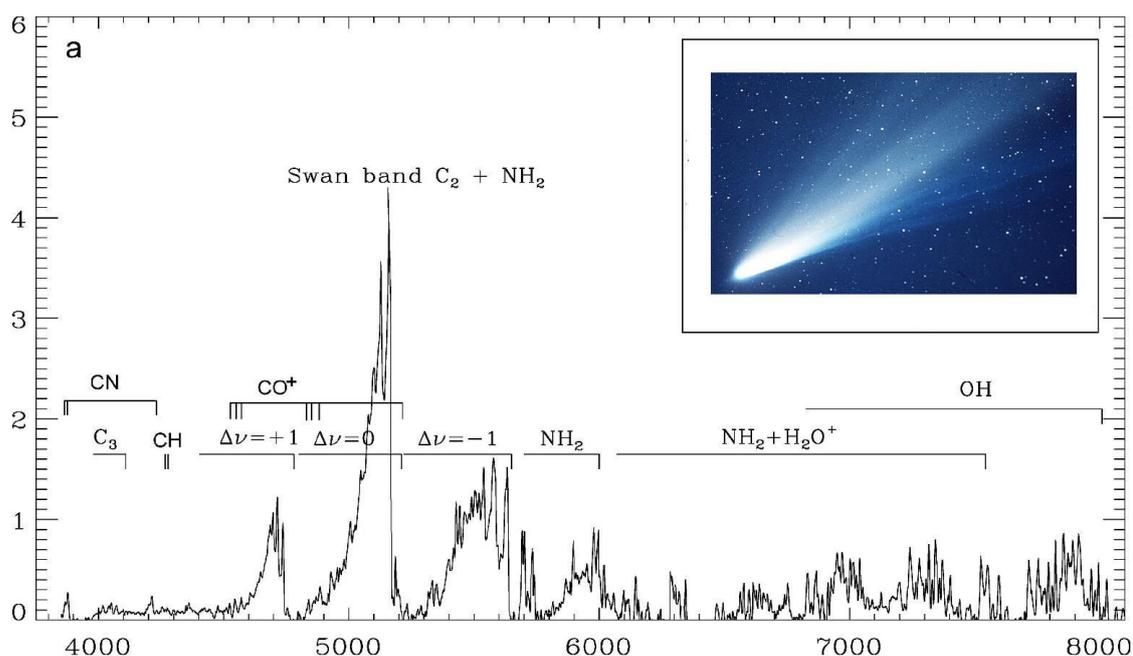


Рис. 1.2. Комета: внешний вид и спектр ее излучения

Предположительно, долгопериодические кометы прилетают во внутреннюю Солнечную систему из облака Оорта, в котором находится огромное количество кометных ядер. Тела, находящиеся на окраинах Солнечной системы, как правило, состоят из летучих веществ (водяных, метановых и других газов), испаряющихся при подлете к Солнцу (рис. 2). Кометы, прибывающие из глубины космоса, выглядят как туманные объекты, за которыми тянется хвост, иногда достигающий в длину нескольких миллионов километров. Ядро кометы представляет собой тело из твердых частиц, окутанное туманной оболочкой, которая называется комой. Ядро диаметром в несколько километров может иметь вокруг себя кому в 80 тыс. км в поперечнике. Потoki солнечных лучей выбивают частицы газа из комы и отбрасывают их назад, вытягивая в длинный дымчатый хвост, который движется за ней в пространстве.

Звезда – массивный плазменный шар, излучающий свет (рис. 3) и удерживаемый в состоянии равновесия силами собственной гравитации и внутренним давлением, в недрах которого происходят реакции термоядерного синтеза. Ближайшей к Земле звездой является Солнце.

В силу значительной удаленности звезд от Земли, интенсивность их излучения кажется незначительной по сравнению с любыми другими источниками света, в том числе и Солнца (рис. 1.3).

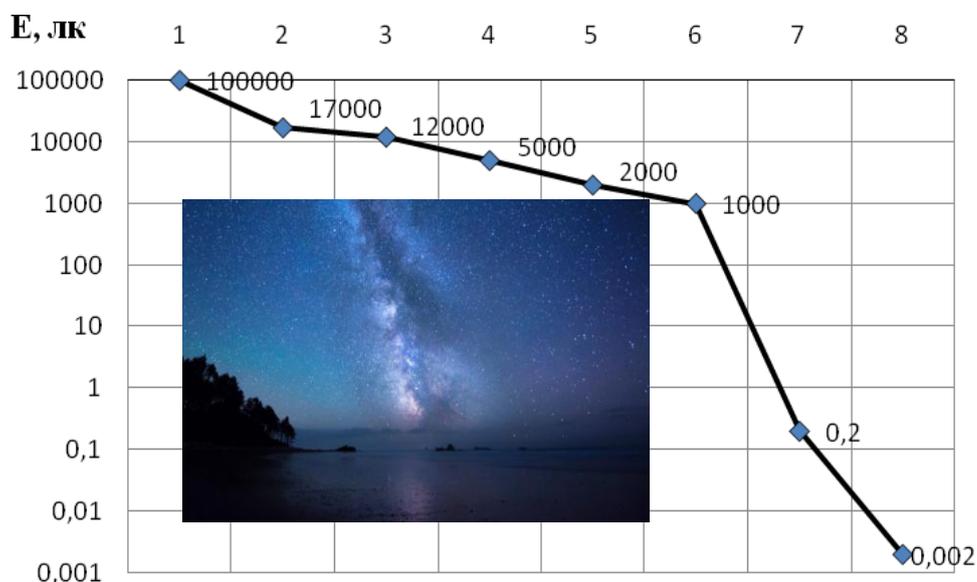


Рис. 1.3. Интенсивность света от звезд в сравнительном порядке:

- 1 – наибольшая солнечная освещенность при чистом небе; 2 – летом в средних широтах в полдень; 3 – в облачную погоду летом в полдень; 4 – зимой в средних широтах; 5 – на открытом месте в пасмурный день; 6 – восход и заход Солнца в ясную погоду; 7 – ночью в полнолуние; 8 – в безлунную ночь

Звезды образуются из газовой-пылевой среды (главным образом из водорода и гелия) в результате гравитационного сжатия. Температура вещества в недрах звезд измеряется миллионами кельвинов, а на их поверхности – тысячами кельвинов. Энергия подавляющего большинства звезд выделяется в результате термоядерных реакций превращения водорода в гелий, происходящих при высоких температурах во внутренних областях.

К естественным источникам света планетного масштаба относятся молнии, зарницы, огни Эльма и полярные сияния.

Молния – это электрический разряд в атмосфере в виде гигантской искры, сопровождаемый вспышкой света и громким звуком (громом). Большая часть излучения в видимой области спектра приходится на «синюю» и «красную» части (рис. 1.4).

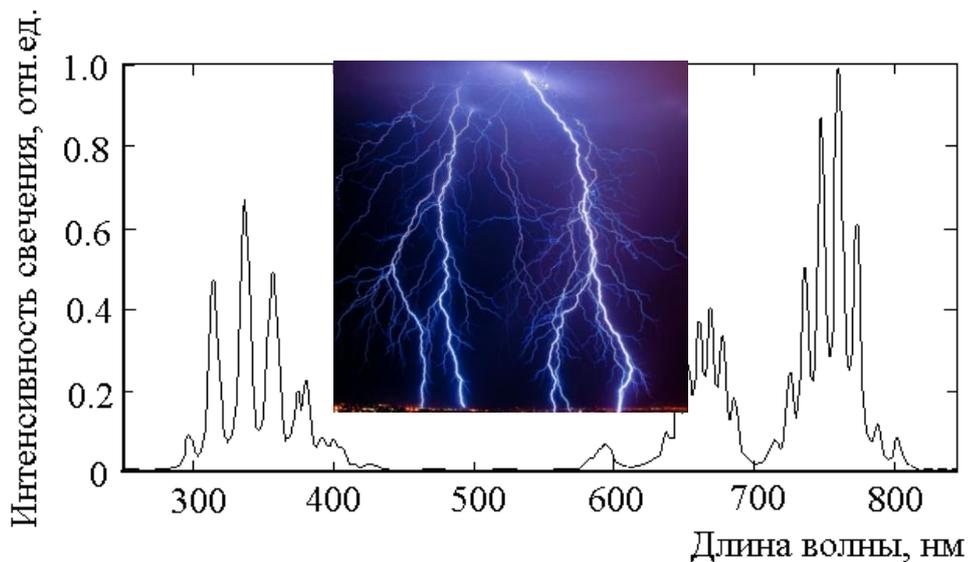


Рис. 1.4. Внешний вид и спектр излучения молнии

Для формирования молнии необходимо разделение положительных и отрицательных зарядов в облаке. После накопления достаточно больших зарядов происходит светящийся искровой разряд, канал которого напоминает разветвляющуюся фигуру. Потенциальная энергия, запасенная грозным облаком, превышает 10^{13} – 10^{14} Дж, то есть равна энергии термоядерной мегатонной бомбы. Длина молнии достигает от 1 до 10 км, а диаметр ее канала иногда составляет метр и больше. Сила тока в канале молнии огромна: от 1–2 до 200 кА. Выделяется энергия до миллиарда Дж, температура канала достигает 10000 К, что и порождает интенсивно яркий свет при разряде молнии, на мгновение освещающий окружающую местность.

Обычно разряд проходит между облаками, но нередко происходит разряд между облаком и поверхностью Земли. Напряжение между двумя облаками, а также между облаками и Землей достигает десятков миллионов вольт. Установлено, что и свечение, и разогрев плазменного канала развиваются в направлении от земли к туче, поэтому после паузы мощный импульс основного тока распространяется по восстановленному каналу снизу вверх. Однако длительность разряда составляет всего лишь тысячные доли секунды. Поэтому общий заряд, протекающий при одной вспышке молнии, не превосходит сотни кулонов.

Зарница – кратковременная вспышка света, наблюдаемая на ночном небе вблизи горизонта (рис. 1.5, *а*). Вызывается освещением атмосферы молниями в местах, расположенных за горизонтом. Гром же не слышен из-за большой удаленности.

Огни Эльма (рис. 1.5, *б*) или «Огни святого Эльма» – электрические разряды в атмосфере в форме светящихся кисточек, наблюдаемые иногда на острых концах, возвышающихся над земной поверхностью высоких предметов (башни, мачты, одиноко стоящие деревья, острые вершины скал).

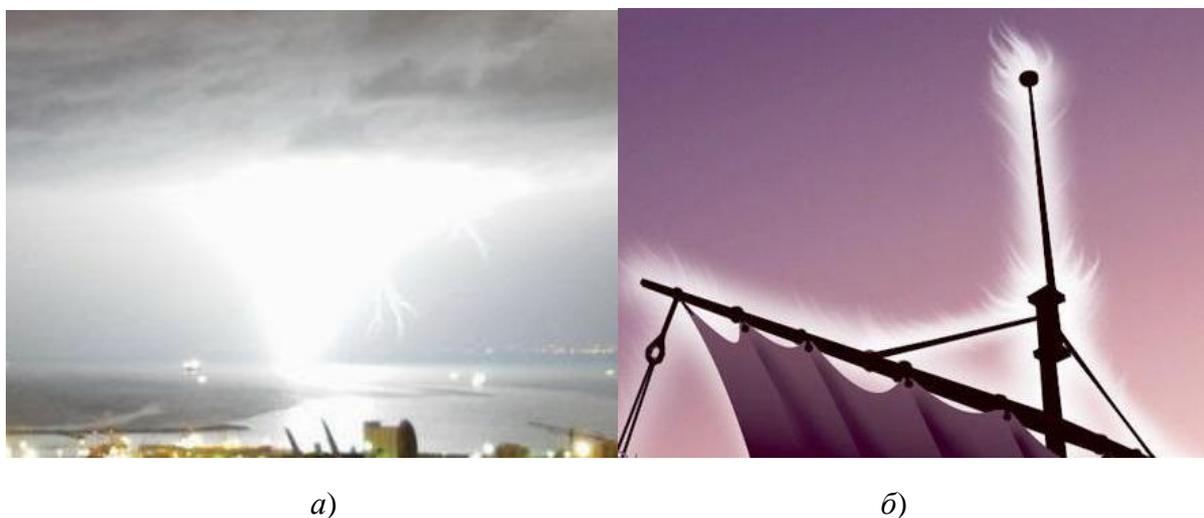


Рис. 1.5. Производные электрические явления: *а*) зарница, *б*) «Огни святого Эльма»

Свое название получили в средние века по названию церкви святого Эльма, на башнях которой они часто возникали. Огни Эльма образуются в моменты, когда напряженность электрического поля в атмосфере у острия достигает величины порядка 500 В/м и выше, что чаще всего бывает во время грозы или при ее приближении, а зимой во время метелей. По физической природе огни Эльма представляют собой особую форму коронного разряда.

1.3. Неэлектрические искусственные плазменные источники оптического диапазона на твердом топливе

Знакомство с историей развития бытовых светильников помогает лучше понять взаимосвязь и взаимное влияние техники и культуры в этих объектах предметной среды жилища, чрезвычайно разнообразных по своим формам.

Искусственные источники света дают возможность человеку не прекращать своей производственной и культурной деятельности в темное время суток, когда отсутствует естественный свет.

Существуют свидетельства того, что человек разумный (*Homo sapiens*) и неандертальцы (*Homo neanderthalensis*) умели разводить и поддерживать огонь. Наиболее древние свидетельства использования огня были найдены в пещерных отложениях с возрастом, насчитывающим примерно 300–400 тысяч лет. Согласно легендам, огонь был подарен человечеству Прометеем.

Первоначально огонь добывали при возгораниях деревьев от удара молний. Позднее люди научились добывать огонь путем трения двух кусков древесины друг о друга или высекания искр из кремня. Последний способ с начала железного века был усовершенствован при помощи огнива и применялся до начала массового производства в 19 веке спичек французского химика Жана Шанселя и английского химика Джона Уокера.

Ранее спички были изобретены в средневековом Китае и представляли собой тонкие щепочки с кончиками, пропитанными чистой серой. Зажигались они не путем трения, а путем соприкосновения с тлеющим трупом. Эти «прото-спички» упоминаются в китайских текстах XIII–XIV веков. К XV веку эта новинка дошла до Европы, но повсеместного распространения не получила. Подобные серные палочки стали использоваться в Европе только к XVII–XVIII векам до тех пор, пока развитие химии не позволило их усовершенствовать [2].

Первым источником тепла и света, где в качестве топлива используется древесина или уголь, является костер – источник энергий химической природы. Рабочим органом является плазма – раскаленный газ, который образуется в зоне горения при термическом разложении топлива в присутствии кислорода. Долгие века этот источник света вполне устраивал людей, хотя и был громоздким и крайне неэффективным источником света. Это обусловлено тем, что значительную часть своей энергии костер должен затрачивать на термическое разложение горючего.

Костер служил стационарным, как правило, локальным источником света и выполнял следующие жизненно важные функции: согревал жилище и его обитателей, служил приготовлению пищи, освещал окружающее человека пространство, служил культовым целям, о чем свидетельствуют не только исторические источники, но и спектральная характеристика его излучения (рис. 1.6).

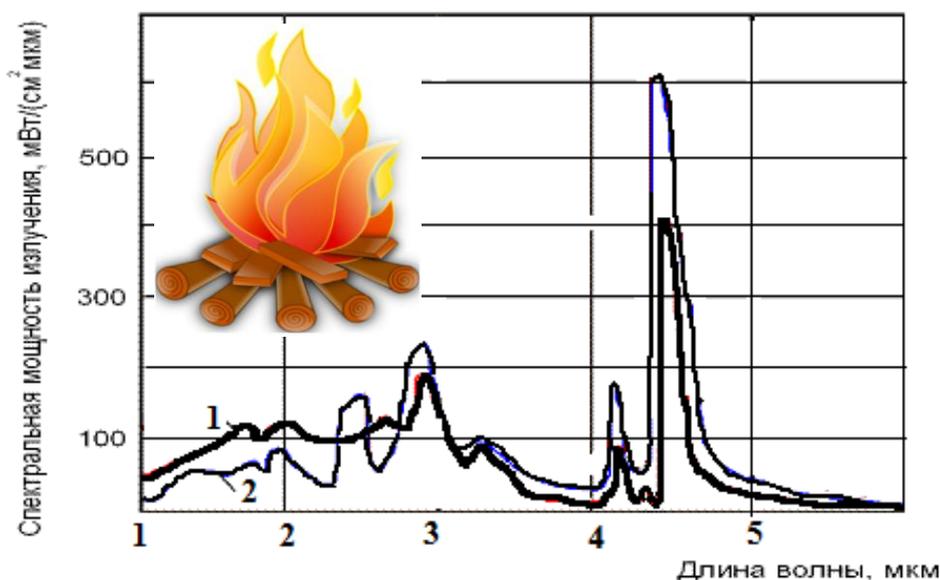


Рис. 1.6. Внешний вид костра и спектр излучения пламени: 1 – древесина; 2 – спирт

Первоначально жилище человека освещалось одним источником, находящимся в центре. Для сохранения огня в необходимых случаях тление углей поддерживалось в специальных условиях, например в берестяных корзинках. Необходимость в дополнительном боковом освещении возникла одновременно с потребностью человека к самовыражению в наскальных росписях.

Самым первым оборудованным источником искусственного света был очаг. *Очаг* – это открытая площадка, предназначенная для разведения и поддержания огня (рис. 1.7).

Границы очага очерчиваются ямой или камнями, сложенными по периферии костра, и в таком представлении очаг является облагороженным вариантом костра.

По археологическим данным, очаги известны с эпохи раннего палеолита (древний каменный век). В позднем палеолите распространились очаги, сложенные из камней и иногда обмазанные глиной. В круглых жилищах очаги обычно находятся посередине (например, в чумах ненцев и эвенков), в прямоугольных – ближе к стене, преимущественно напротив входа (например, в домах у некоторых народов Дагестана).



Рис. 1.7. Очаг, внешний вид

Устройством переходного типа является очаг, расположенный вплотную к стене, с отводом дыма посредством дымохода (у некоторых народов Балканского полуострова, Сибири, Кавказа и Средней Азии). Со временем из пристенного очага развился **камин** (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Камин, внешний вид

Огонь стал мобильно использоваться в лучинах и смоляных факелах, которые стали распространенным явлением в жизни человека. В пламени костра, лучины и факела свет излучается раскаленными твердыми частичками углерода. На протяжении многих столетий в домах крестьян Северной Европы, в том числе и в России, основным источником света была лучина. *Лучина* – это тонкая щепка, один конец которой зажимался, например расщепленным стержнем (рис. 1.9), второй конец зажигался для освещения огнем.

Чаще всего светцы выковывались из металла. Иногда в качестве основания светцов применялись деревянные детали. Светцы были весьма разнообразными, они украшались различными металлическими завитушками, а деревянные детали делались резными и иногда покрывались росписью [2].

1.4. Неэлектрические искусственные плазменные источники оптического диапазона на жидком топливе

Кроме древесины топливом для источников света являются природные жиры. Еще, будучи пещерным жителем, древний человек открыл, что жиры и масла могут гореть. Природные жиры подразделяют на жиры животные и растительные.

Животный жир был легко доступным и более дешевым, поэтому использовался людьми для освещения на протяжении многих веков. Животные жиры – это природные продукты, получаемые из жировых тканей животных. Они представляют собой смесь триглицеридов высших насыщенных или ненасыщенных жирных кислот, состав и структура которых определяют основные физические и химические свойства животных жиров. Температура плавления животных жиров составляет 30–55 °С. Животные жиры выделяют из жировой ткани и отделяют от белков и влаги посредством нагревания выше температуры плавления.

Растительные жиры получают путем отжима из семян растений. Поскольку растительные жиры удавалось получать в ограниченных количествах, то в осветительных целях их использовали редко.

Самый первый светильник – прообраз масляной лампы – представляет собой круглую каменную чашу с медвежьим жиром, в которую помещался мох, к которому подносился огонь.

Первобытный человек открыл также, что кусок сухого дерева и веревка из травы, обмакнутые в растопленный жир, представляют собой очень удобный переносной источник света – *факел* (рис. 1.11). Время появления первых факелов неизвестно и может составлять десятки и даже сотни тысяч лет до нашей эры.

В стационарном варианте факел устанавливался в щели между камнями. В средневековых жилищах для крепления факела на плоскости стены стали применяться специальные кованые зажимы.

В видимом диапазоне спектр открытого огня факела захватывает лишь часть желтой и красной области. Однако считается, что древний

человек лучше видел в красном свете, а зрение современного человека несколько смещено в сторону фиолетового. Поэтому факел вполне устраивал древнего человека в качестве искусственного источника света.

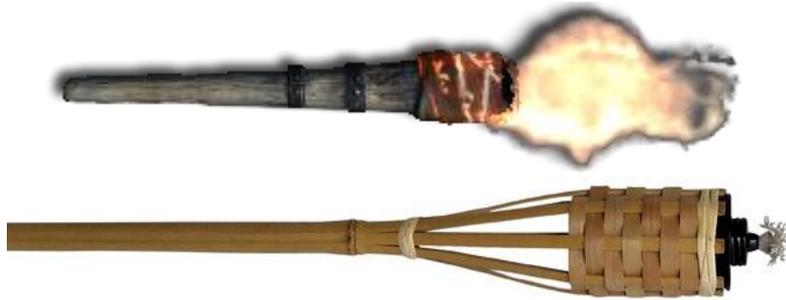


Рис. 1.11. Факел деревянный (выше) и керосиновый (ниже)

Несмотря на то, что факел – очень древнее изобретение, он применяется и поныне: его нынешние осовремененные потомки зажигают олимпийский огонь.

После освоения факела и лучины прогресс в области искусственного освещения закономерно привел к изобретению *масляной лампы* и *свечи*.

Прообраз масляной лампы представляет собой круглую каменную чашу с медвежьим жиром, в которую был погружен фитиль. Серийное производство глиняных ламп с маслом было начато около 4500 лет назад первыми производителями светотехнического оборудования (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Глиняная лампа с маслом, внешний вид

В Древней Греции широкое распространение получили напольные светильники, состоящие из треножника и чаши с горючим веществом (нередко с ароматическими добавками) [2].

Первым потолочным (стационарным) светильником можно считать *лампадарий* (рис. 1.13).

Этот древний осветительный прибор, разновидности которого назывались также *лампионами* или *лампадами*, представлял собой овальную чашу (иногда несколько чаш), которая прикреплялась к балкам на потолке. В чашу наливалась горючая жидкость (масло, животный жир или нефть), и опускался скрученный из растительных волокон фитиль.



Рис. 1.13. Лампадарий

Масляные светильники состояли из сосуда для конопляного или льняного масла и фитиля. Материалом для их изготовления чаще всего служила глина, реже бронза.

Сохранилось много образцов подобных светильников периода древней Греции и Рима. Ввиду слабой силы света одного фитиля сосуды для масла снабжались несколькими фитилями, а в композицию одного светильника иногда входило несколько сосудов.

Существенным достижением техники искусственного освещения было создание в V веке до н.э. Каллимахом фитиля из карпасийского льна (несгораемого материала, напоминающего асбест), добывавшегося на острове Крит. Такой «неугасимый огонь» в течение семи веков горел в святилище Афины в Эрехтейоне. О нем упоминает в «Описаниях Эллады» во II веке н.э. путешественник и географ Павсаний.

Как широко распространенный предмет быта светильники стали объектом художественного творчества еще в глубокой древности (рис. 1.14).

Уже в то время их формы и конструкции были весьма разнообразны.

Для украшения бронзовых светильников широко использовались архитектурные мотивы, изображения людей и животных, растительные и геометрические орнаменты. Во времена Древней Греции, Этрурии и Рима наряду с богато декорированными бронзовыми светильниками в большом количестве изготавливались масляные светильники из обожженной глины. В качестве примеров таких древнейших образцов можно привести масляные светильники из керамики и бронзы, найденные при раскопках Геркуланума, Помпеи и в Херсонесе [2].



Рис. 1.14. Масляные светильники древности

Само по себе изобретение свечи стало закономерным итогом распространения масляных светильников. Дело в том, что жир большинства животных малотекуч, а следовательно, не способен пропитывать фитиль и создавать капиллярный эффект, необходимый для подъема горючего по фитилю. Но раз нет возможности поднимать горючее к фитилю, есть возможность опустить фитиль к горючему. Это стало предпосылкой к изобретению свечи.

Появление свечи явилось серьезным прорывом в области создания новых видов светильников. Свеча была во многом удобнее всех остальных устройств: она не так сильно коптила, оказалась существенно более экономичной и простой в производстве.

Первые *свечи* – это бруски из перетопленного твердого животного жира (сала) с фитилем внутри появились в третьем тысячелетии до нашей эры. Предвестниками первых свеч в Древнем Египте, а также в Китае, Индии, Японии были изделия с применением животного жира или экстрактов из растений и натурального воска из насекомых. Древние китайцы скручивали рисовую бумагу для фитиля, который макали в специальный горючий раствор, полученный из смеси местных насекомых с зерновыми культурами. В Древней Японии свечи делали из материала, полученного из ореховых деревьев. Коренные американцы жгли масляную рыбу (*candlefish*), надетую на разветвленную палку.

Однако историю изобретения свечи считают со времен расцвета римской империи. Именно римляне впервые начали использовать специальный фитиль при изготовлении свечей, которыми они освещали свои дома и храмы, а также использовали для перемещения по темным улицам городов и деревень. Историки утверждают, что первые свечи в Греции и древнем Риме появились в 500 г. до н.э.

Но наибольшее распространение свечи получили в эпоху Средневековья, когда в крупных городах появились гильдии свечных мастеров, чья продукция начала продаваться в небольших магазинчиках во всех населенных. В средние века свечи изготавливались обычно в домашних условиях домохозяйками. Причем, если современные свечи делают путем литья с использованием специальной формы, то в те времена большей популярностью пользовались *маканые свечи*. Для изготовления маканых свечей брали фитиль и окунали его в растопленный жир, получаемый из свиного, бараньего или коровьего сала, растопленного в большом ведре или кастрюле. Эта процедура повторялась многократно, пока не получали свечи нужной толщины.

Кроме того, в средние века человек научился получать мед не из ульев диких пчел, а из собственного пчеловодческого хозяйства. Именно тогда люди поняли, что свечи можно изготавливать не только из жира, но и из воска. Так началась история восковой свечи. Восковые свечи позволили избежать недостатков жировых свечей, так как воск не дает ни копоти, ни неприятного запаха, он горит ярко и ровно. Но жир в больших количествах добыть проще, чем воск, поэтому восковые свечи были дороги и использовались лишь в домах богатых горожан и знати.

С изобретением свечи постепенно возникает целая плеяда светильников: изящные бра, вычурные канделябры, великолепные люстры.

Более поздней модификацией древнегреческого треножника с чашей и горючим веществом является канделябр. *Канделябр* (от лат. *candēlābrum* – «подсвечник») – это декоративная подставка с разветвлениями – «рожками» – для нескольких свечей или ламп. Канделябр с многочисленными рожками, расположенными по окружности, украшенный хрустальным убором, называется *жирандоль*, напольный канделябр называется торшером. Если подставка рассчитана на одну свечу, используется слово *подсвечник*, хотя оно применяется и как синоним канделябра. Тяжелый подсвечник также называется *шандалом*. В отличие от треножника, канделябр имел единственную опору, расширяющуюся к основанию. В разных культурах один и тот же светильник мог называться по-разному, например, шандалом у персов или *менорой* у иудеев (рис. 1.15).



Рис. 1.15. Канделябр, жирандоль, шандал, менора

В XVIII веке благодаря прогрессу в китобойном промысле появился еще один материал, составивший большую конкуренцию воску и жиру – спермацет. **Спермацет** – это масляное вещество, добывавшееся из верхней части головы кашалота. Этот материал был жестче, чем жир и воск, и не таял в летнюю жару. Спермацетовые свечи были настолько яркими, что их свет использовался в качестве стандарта в фотометрии. Но из-за необходимости защиты китов от вымирания в XX веке добыча спермацета была запрещена и прекращена.

Но основные изобретения, которые были использованы в свечном производстве, были сделаны в XIX веке. В это время химики открыли, что животный жир состоит из нескольких компонентов – стеариновой и олеиновой кислот, соединенных с глицерином. При удалении глицерина получается вещество под названием «стеарин», которое тверже жира и лучше горит. Первые стеариновые свечи появились в 1816 г.

К тому же в 1834 г. Джозеф Морган изобрел аппарат для производства свечей с механизмом, который сам выдавливал свечи после их застывания. Это было механическое устройство, в котором впервые применялась форма. Она имела вид цилиндра, снабженного двигающимися поршнями, которые выталкивали готовую, уже остывшую свечу. Механизация свечного мастерства сделала этот продукт доступным для всех.

В 1850-х гг. химики смогли выделить восковую субстанцию естественного происхождения из неочищенной нефти. Так был получен парафин. Парафин имел кристаллически-белую окраску, был прочным, горел небесно-белым пламенем и не выделял неприятного запаха. Вещество это было гораздо дешевле воска и спермацета, а по яркости создаваемого света ничуть им не уступало. Первые парафиновые свечи появились в 1830 г. (рис. 1.16).

Свечи и лампы дают очень слабый свет. Спектр открытого огня сильно отличается от солнечного и захватывает лишь часть желтой и красной областей видимого диапазона. Выполнять точную работу при таком свете практически невозможно, и многие средневековые ремесленные гильдии запрещали работу по ночам при искусственном свете, так как качество изделий при этом резко снижалось.



Рис. 1.16. Парафиновая свеча

Освещение в России имеет не менее богатую историю и не менее глубокие корни. С весны до осени деревенские избы на Руси вообще не освещались, поскольку считалось, что с Пасхи до Покрова вставать и ложиться надо с зарей. Для домашних дел хватало света от трех окон на главном фасаде дома. В русских крестьянских семьях свечи зажигали лишь в праздники, а зимой жгли лучины и фитили.

Первые потолочные светильники с использованием свечей на Руси стали применять в XII веке поначалу только для освещения храмов,

подвешивая их под главным куполом. Назывались такие светильники *паникадилами* (рис. 1.17). Название «паникадило» или «поликадило» происходит от греческого слова «поликанделон», означающего многосвечник [2].



Рис. 1.17. Паникадило

Светильник состоял из нанизанных друг на друга отдельных частей и заканчивался внизу крупным гладким или украшенным орнаментом шаром. К стержню прикреплялись расходящиеся отроги-перья со свечниками. Изготавливали паникадила из литой меди, кованого железа, серебра, кости, олова. Наиболее устойчивая композиция паникадила состояла из центральной стержневой конструкции со сложными балясинами, а позднее – с шарами, от которой ответвляются многоярусные свечники.

Выглядели паникадила настолько роскошно, что приводили в изумление приезжавших в Россию иностранцев. Паникадило можно считать прообразом современной люстры, поскольку его конструкция легла в основу бытовых светильников более позднего времени.

В XVII веке, когда зародилась русская стеклянная промышленность, на заводе в селе Измайлово стали изготавливать стеклянные люстры, форма которых была заимствована у паникадил XVI–XVII веков. Однако долгое время использование подвесных светильников в жилых помещениях считалось роскошью.

В эпоху Петра I начала бурно развиваться гражданская архитектура: на берегах Невы выросал строящийся по европейским канонам Санкт-Петербург, в Москве среди деревянных хором и изб горожан стали появляться богатые особняки, интерьеры которых требовали новых, более совершенных светильников. Появились разнообразные фонари, стенники, бра, подсвечники, шандалы, канделябры, жирандоли. Изменили свой внешний вид и паникадила. Люстры того времени изготавливались в стиле «русского барокко»: в их конструкции преобладала изогнутая линия, а на медном каркасе закреплялся хрустальный убор в виде бесцветных или розовато-лиловых граненых подвесок.

В середине XVIII века в России началось производство фарфора, благодаря чему более элегантный вид приобрели и светильники. Новый материал стал успешно применяться для их декора, сменив кованые железные цветы и гирлянды, и в XIX веке получил широкое распространение для производства ламп и подсвечников.

Во второй половине XVIII века вычурные формы сменились строгим классицизмом. Пышные люстры, перегруженные тяжелыми хрустальными подвесками в виде дубовых листьев, были заменены светильниками с четкой конструкцией, в основе которой был горизонтальный стержень и круглые бронзовые обручи. Центральные стержни таких люстр состояли из фигурных деталей, выполненных из окрашенного стекла.

Проектированием светильников часто занимались сами архитекторы, поскольку художественное оформление осветительных приборов имело большое значение в общем решении интерьера.

В начале XIX века основное место среди материалов для светильников заняла золоченая бронза. Верхний конец бронзового подвесного светильника обычно прикреплялся к короне, составленной из листьев аканта, а в нижний обруч вставлялось стеклянное дно. Обручи украшались гравировкой, плоской чеканкой, накладными прорезными пластинами в виде пальметт, меандров и других фигур.

Иногда масляным лампам даже отдавалось предпочтение перед свечами: например, существовали жестяные светильники, снабженные специальными резервуарами в виде античных ваз, которые заправлялись горючими маслами. Преимущества этого способа заключались в том, что, во-первых, увеличивалась сила света, во-вторых, резервуары вмещали много масла, и отпадало неудобство заменять быстро таявшие свечи.

Большой популярностью пользовались так называемые *«карсельские» масляные лампы* (рис. 1.18), названные так по имени французского изобретателя Гийома Бертрана Карселя, который снабдил

резервуары для масла механическим «часовым» устройством, нагнетающим масло в горелку. Вследствие этого устройства пламя карсельской лампы отличается большей яркостью, правильностью горения и постоянством света, так что свет карсельской лампы во Франции был принят за единицу света.



Рис. 1.18. Масленая лампа Гийома Бертрана Карселя

Историческое развитие световых приборов заключается в постоянном изменении конструкции и принципов действия источников света, связанных с ними оптических устройств и дополнительных различных конструктивных деталей.

В XIX веке получили распространение **керосиновые лампы**. Они обладают более сложными, чем все предшествующие им светильники, конструктивными особенностями [2]. Керосиновые светильники второй половины XIX века выпускались как в виде простых и дешевых изделий машинного производства, так и в виде уникальных дорогих изделий с применением художественного стекла, фарфора и металлического литья (рис. 1.19). Устройство лампы относительно несложно. В емкость заливается керосин, в который опущен одним концом фитиль.

Верхний конец фитиля снабжен механизмом, обеспечивающим небольшое перемещение его по вертикали, и помещен в металлическую горелку, сконструированную таким образом, чтобы обеспечить подвод воздуха в область, ниже верхнего кончика фитиля. Над горелкой устанавливается ламповое стекло в виде трубы переменного диаметра. Колба предназначена для обеспечения тяги и защиты пламени от ветра.



Рис. 1.19. Керосиновые лампы

Дизайн не очень практичных, но безотказных керосиновых светильников был очень изыскан. Эра керосина подарила нам хит в виде лампы «Летучая мышь», получившей широкое распространение (рис. 1.20).

Название керосиновой лампы «Летучая мышь» происходит от слова «*Fledermaus*». Так называлась немецкая фирма, которая в XIX веке создала ветроустойчивый фонарь с керосиновой лампой. Лампа «летучая мышь» многократно использовалась дизайнерами для создания новых разновидностей светильников в индустриальном стиле [2].



Рис. 1.20. Керосиновая лампа «Летучая мышь»:

1 – ручка; 2 – ушко газоотвода; 3 – стекло; 4 – стеклодержатель; 5 – горелка с фитилем;
6 – пробка горловины емкости с керосином

Керосиновая лампа является источником не только света, но и тепла. По этой причине в XX веке она широко применялась в составе переносного термогенератора, изобретение которого опирается на открытия, сделанные на рубеже 18–19 веков.

Томас Иоганн Зеебек (9 апреля 1770 г., Ревель (ныне – Таллин) – 10 декабря 1831 г., Берлин), немецкий физик, в 1822 г. опубликовал результаты своих опытов в статье «К вопросу о магнитной поляризации некоторых металлов и руд, возникающей в условиях разности температур», опубликованной в докладах Прусской академии наук [1].

В 1834 г. был открыт эффект Пельтье, обратный эффекту Зеебека. Жан Шарль Атаназ Пельтье, французский физик (22 февраля 1785 г., Ам – 27 октября 1845 г., Париж), в 1834 г. открыл явление выделения или поглощения тепла при прохождении электрического тока через контакт двух разнородных проводников, получившего название по его имени – «Эффект Пельтье». Приборы, принцип работы которых использует «Эффект Пельтье», называются элементы Пельтье. В 1840 г. он ввел понятие электростатической индукции.

Первую термоэлектрическую батарею создали в середине 19 века независимо друг от друга датский физик Ханс Кристиан Эрстед (14 августа 1777 г., Рудкебинг, о. Лангеланн – 9 марта 1851 г., Копенгаген) и французский математик и физик Жан Батист Жозеф Фурье (21 марта 1768 г., Осер, Франция – 16 мая 1830 г., Париж) [1].

В качестве термоэлектродов использовались висмут и сурьма, как раз та самая пара из чистых металлов, у которой максимальная термоэдс. Горячие спаи нагревались газовыми горелками, а холодные помещались в сосуд со льдом.

В процессе опытов с термоэлектричеством позднее были изобретены термобатареи, пригодные для использования в некоторых технологических процессах и даже для освещения. В качестве примера можно привести батарею Кламона, разработанную в 1874 г., мощности которой вполне хватало для практических целей: например, для гальванического золочения, а также применения в типографии и мастерских гелиографуры.

В пятидесятые годы советская промышленность начала выпускать термогенератор ТГК-3 (рис. 1.21). Основное его назначение состояло в питании батарейных радиоприемников в сельской местности. Мощность генератора составляла 3 Вт, что позволяло питать батарейные приемники, такие как «Тула», «Искра», «Таллин Б-2», «Родина-47», «Родина-52».



Рис. 1.21. Термогенератор ТГК-3

Термогенератор предназначался для использования в сельской местности, где для освещения использовались керосиновые лампы «молния». Такая лампа, оснащенная термогенератором, становилась

не только источником света, но и электричества. При этом дополнительных затрат топлива не требовалось, ведь в электричество превращалась именно та часть керосина, которая просто улетала в трубу. К тому же, такой генератор был всегда готов к работе, конструкция его была такова, что ломаться в нем просто нечему. Генератор мог просто лежать без дела, работать без нагрузки, не боялся коротких замыканий. Срок службы генератора, по сравнению с гальваническими батареями, казался просто вечным.

Роль вытяжной трубы у керосиновой лампы «молния» играет удлиненная цилиндрическая часть стекла. При использовании лампы совместно с термогенератором стекло делалось укороченным, и в него вставлялся металлический теплопередатчик.

Внешняя часть теплопередатчика имеет форму многогранной призмы, на которой установлены термобатареи. Чтобы увеличить эффективность теплоотдачи теплопередатчик внутри имел несколько продольных каналов. Проходя по этим каналам горячие газы уходили в вытяжную трубу, попутно нагревая термобатарею, точнее, ее горячие спаи. Для охлаждения холодных спаев использовался радиатор воздушного охлаждения. Он представляет собой металлические ребра, прикрепленные к внешним поверхностям блоков термобатарей.

Освещение с применением керосиновых ламп не потеряло актуальности в XXI веке, чему свидетельствуют «свежие» патенты на изобретения, например заявка 2004132386/28, 10.11.2004 автора Дятленко В.А. на тему «Лампа с фитильной горелкой», опубликованная в 2006 г. (рис. 1.22) [3].

Устройство, изображенное на рис. 1.22, содержит следующие элементы: 1 – топливная емкость, 2 – корпус горелки, 3 – фитильная трубка, 4 – фитиль, 5 – исполнительный элемент (оболочка) механизма перемещения фитиля, 6 – отражательный колпачок, 7 – корона, 8 – защитное стекло, 9 – заглушка фитильной трубки, 10 – приводной элемент механизма перемещения фитиля, 11 – герметизирующая прокладка между горловиной топливной емкости корпусом горелки, 12 – герметизирующая втулка между корпусом горелки и фитильной трубкой, 13 – отверстия для подвода воздуха, 14 – упругие лепестки, удерживающие защитное стекло, 15 – отверстия для подвода воздуха, 16 – передаточная тяга, 17 – топливо. Привод регулирования фитиля включает тягу 18 с хвостовиком 19, неподвижно соединенным с тягой 16. Тяга 16 выполнена заодно с кулисой 20 и поддерживающим кольцом 21 и размещена с возможностью осевого перемещения относительно корпуса 2.

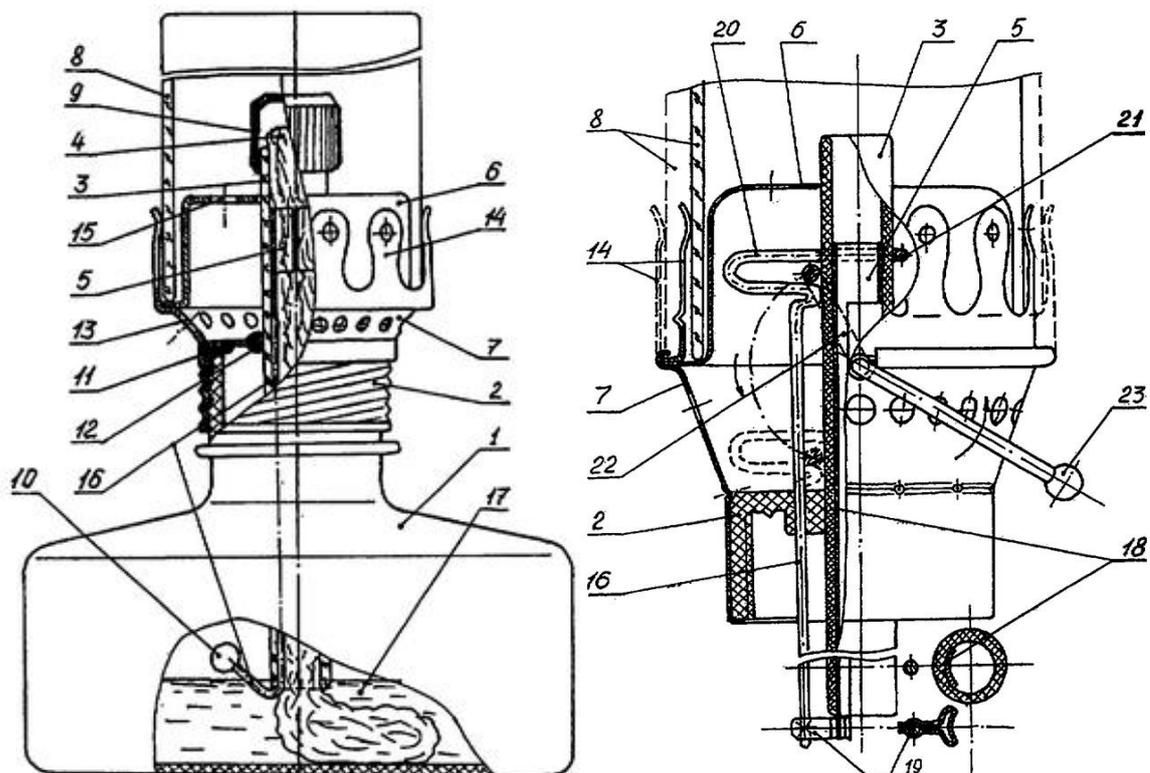


Рис. 1.22. Лампа с фитильной горелкой

Подвижное соединение тяги 16 и корпуса 2 выполнено с небольшим натягом, обеспечивающим герметичность соединения. В пазу кулисы 20 с возможностью поворота размещен кривошип 22, выполненный заодно с рукояткой 23.

Приведенный перечень элементов лампы с фитильной горелкой Дятленко В.А. призван еще раз обратить внимание читателя на сложность конструкции общеизвестной керосиновой лампы.

1.5. Неэлектрические искусственные плазменные источники оптического диапазона на газообразном топливе

Говоря о неэлектрических плазменных источниках оптического диапазона, невозможно обойти стороной *газовые светильники*. Природный газ был известен и использовался человеком с античных времен, как в религиозных целях (священные огни в Персии), так и в промышленных целях (мастерские по изготовлению керамических изделий в Китае).

Газовая лампа была изобретена в 1799 г. французским инженером, изобретателем, профессором механики Филиппом Лебоном (1769–1804 гг.), который весьма преуспел и в опытах по получению светильного

газа – смесь водорода (50 %), метана (34 %), угарного газа (8 %) и других горючих газов, получаемая при пиролизе каменного угля или нефти. Филипп Лебон назвал ее термолампой.

Если мы ограничимся изучением фонарей освещения, мы должны начать с фонаря «струя» или «крысиный хвост», представляющего собой обычное отверстие, через которое выходит газ под очень слабым давлением. Газ, горевший в них, давал слабый свет [2].

После некоторых усовершенствований термолампа в 1811 г. превратилась в широко известный *газовый рожок*, который на десятилетия стал основным светильником на улицах и в домах европейцев и американцев.

Сам по себе газовый светильник-рожок (рис. 1.23) представлял собой трубку того или иного профиля, снабженную механизмом регулирования подачи газа с возможностью полного ее прекращения, а также иногда системой позволявшей увеличить приток воздуха к зоне горения [4].

Аналогично масляным лампам приток мог быть внутренним – по трубке меньшего диаметра, расположенной внутри газовой, и внешним.

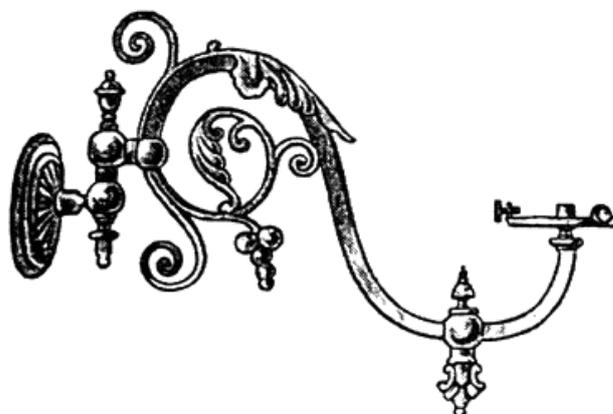


Рис. 1.23. Газовая лампа «Газовый рожок»

В Англии освещение светильным газом впервые было применено в 1798 г. в главном корпусе мануфактуры Джеймса Ватта, а спустя шесть лет возникло первое общество газового освещения [4]. В 1818 г. газом осветили улицы Парижа, а затем новый способ уличного освещения стал распространяться во всех больших городах на континенте и на Британских островах (рис. 1.24).

Газовые рожки были медными, с разными типами горелок. Имелись горелки с открытым пламенем, аграндовы горелки, регенеративные горелки и горелки накаливания. Наиболее простыми и самыми распространенными были горелки с открытым пламенем. Обычно они

были изготовлены из каолина и имели два круглых сопла под углом 90° друг другу, образующих пламя в форме рыбьего хвоста.



Рис. 1.24. Газовый уличный фонарь на рубеже XIX – XX веков

Значительно реже, как наименее экономичные, встречались разрезные горелки, пламя которых, проходя через узкую щель в каолиновом наконечнике, принимало форму крыла летучей мыши. Чтобы пламя было полноразмерное и без мерцания, газ следовало открывать полностью. Горелки «рыбий хвост» как дешевые, простые и способные обеспечить очень хорошее сгорание газа использовались в небольших комнатах. Лучшими считались горелки, изготовленные фирмой Сагга из Вестминстера. Пламя давало гораздо более яркий и устойчивый свет, когда вырывалось из сопла горелки горизонтально, а лепесток получаемого языка пламени лежал в вертикальной плоскости (рис. 1.25). Вертикальное же пламя в стеклянном шаре непрерывно мерцало и утомляло глаза. Горелка «рыбий хвост» потребляла от трех до четырех кубических футов газа в час и давала свет от шести до девяти свечей [4].

Когда к середине 1880-х гг. газовое освещение получило конкурента в лице электрического освещения, газовые компании вынуждены были финансировать новые научные исследования с целью усовершенствования горелок.

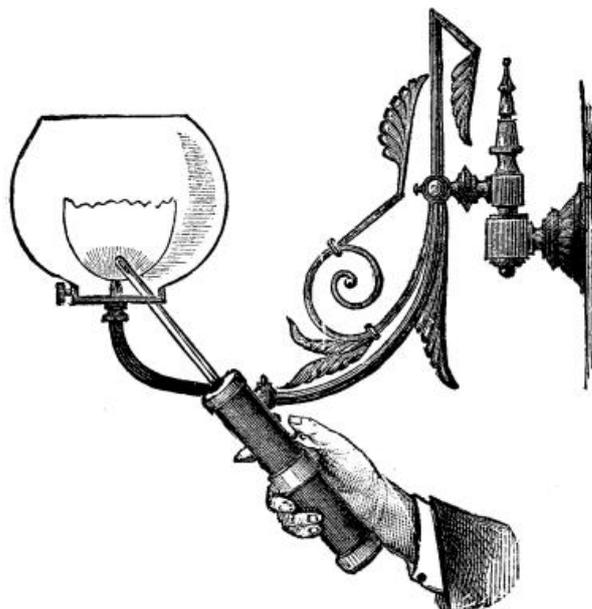


Рис. 1.25. Витой газовый рожок из латуни в момент поджега

Так возникли регенеративные газовые горелки, в которых продукты горения использовались для нагревания газа и поступающего воздуха, однако при довольно ярком пламени (более 60 свечей) потребление газа тоже было велико. Единственным (и последним) фундаментальным улучшением конструкции газовых горелок, сделанным после Агранда, была разработка калильной сетки, позволившей резко повысить яркость свечения за счет более полного сгорания горючего и свечения самой сетки. Честь ее изобретения принадлежит австрийскому химику Карлу Ауэру Велсбаху (1858–1929 гг.), который в 1885 г. предложил «Осветительное приспособление для газовых и иных горелок». Само по себе изобретение заключалось в том, чтобы специально обработанную ткань помещать в пламя горелки. В 1892 г. удалось найти оптимальный состав для этой специальной обработки: хлопчатобумажная ткань пропитывалась смесью из 99 % окиси тория и 1 % окиси церия, затем сжигалась, а оставшаяся тонкая структура помещалась в смесь коллодия, эфира, камфары и касторового масла для придания сетке прочности. В результате этого сетка приобретала способность ярко светиться в нагретом состоянии и не рассыпаться в прах при транспортировке. С этого момента в Европе началось обвальное распространение газокалильного, спиртокалильного и, позднее, керосинокалильного освещения. После 1894 г. газокалильные горелки Карла Ауэра были настолько популярны, что позволили газовым компаниям еще на десятилетие оттянуть момент повсеместного распространения электрического освещения. Хотя с современной точки зрения, газокалильные рожки давали очень слабый тусклый свет в 50 свечей, примерно как нынешняя 25-ваттная лампочка накаливания [4].

В помещениях использовались настенные и подвесные светильники. Горелки могли устанавливаться на газовых люстрах – *газельерах* (рис. 1.26), подвешенных к потолку, откуда они спускались для использования [4].

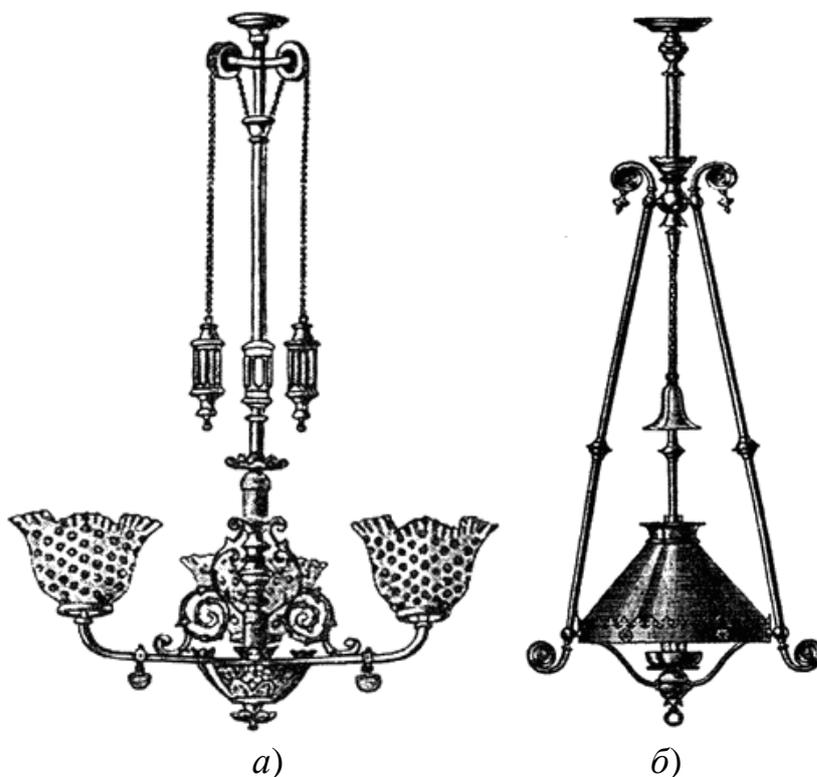


Рис. 1.26. Газельеры 1893 года:
а – трехрожковая газовая люстра из полированной латуни или стали;
б – подвесная газовая лампа из полированной латуни или бронзированной стали с аграндовой горелкой

Газ к газельерам подводился по резиновой трубке. Стенные бра, как правило, монтировались на уровне плеча. Часто они имели шарниры у точек крепления, чтобы направлять свет на нужный объект, и тогда для подвода газа опять же использовалась эластичная резиновая трубка.

Часто светильники снабжались матовыми стеклянными плафонами и декорировались подвесными хрустальными украшениями. Здесь тоже были свои тонкости. Лучшей формой для плафона считалась сферическая, с широкими отверстиями для прохода воздуха сверху и снизу. А вот плафоны в форме дыни или ананаса не рекомендовались, равно как и плафоны в форме блюда. Для гостиных и спален считались самыми подходящими матовый абажур или плафон, имеющие горелки с горизонтальным пламенем, которые давали наилучший результат при минимальном потреблении газа. Для помещений цокольного этажа рекомендовалась горелка с горизонтальным пламенем.

Для экономии газа в Лондоне было принято проводить широкие трубы при низком давлении, поэтому не допускались трубы с внутренним диаметром меньше 1,3 см. Любая труба, проложенная где-либо в доме, должна была быть изготовлена из ковкого чугуна и окрашена в два слоя масляной краской.

Стоимость газа в это время варьировалась от 3 шиллингов до 3 шиллингов 6 пенсов за 1000 кубических футов, то есть газовое освещение обходилось в 16 раз дешевле, чем свечи. Именно из-за дешевизны газа многие богатые дома вообще им не пользовались, расценивая газовое освещение как показатель низкого общественного статуса. Они так и пережили со свечами весь период расцвета газового освещения, сразу перейдя на электричество, которое на первых порах было очень дорого.

Газовое освещение помещений потребителям повседневно доставляло массу проблем. Во-первых, в процессе горения образовывался углекислый газ, кислород связывался, и его содержание в воздухе, соответственно, уменьшалось. При недостатке кислорода водород, из которого газ состоял почти на треть, выгорал полностью, а углерод лишь частично, отчего горелки начинали чадить и стеклянные плафоны светильников покрывались копотью. Во-вторых, при сгорании водорода выделялся водяной пар. Если в закрытом помещении горело несколько светильников, воздух быстро насыщался влагой, что вызывало необходимость частого проветривания, чтобы конденсат не оседал на холодных оконных стеклах и стенах. Однако при проветривании в холодную погоду комнаты быстро выхолаживались, и забота о сохранении тепла пересиливала потребность в ярком освещении.

Кроме неприятностей с конденсатом, горению газа сопутствовали неприятный запах и выброс в воздух продуктов сгорания серы, сернистого газа и примесей аммиачных солей, которые при соединении с водяными парами воздуха образовывали кислоты, разрушительно действовавшие на все, с чем соприкасались. Страдали мебель, серебро и книги. Картины предпочитали вешать на шнурах, нежели на металлической проволоке, поскольку коррозия ее разъедала. Если газ вытекал через прохудившуюся трубу или из горелки, оставленной открытой, это могло вызвать взрыв, особенно если с зажженной свечой искать утечку [4].

В середине XIX века светильный газ считался наиболее прогрессивным топливом для освещения, а его производство – серьезной отраслью индустрии ведущих держав. Светильный газ получался путем перегонки каменного угля в коксовых или газовых печах

с горизонтальными ретортами. В начале в течение примерно 4 ч уголь нагревался без доступа кислорода, выделяя при этом газ. В каждой реторте перегонялось около 200 кг угля. Для увеличения выхода газа за час до окончания цикла в реторту пускали пар, который разлагался при контакте с раскаленным углем. Из 100 кг угля получалось около 50 м^3 газа. В первоначальном виде газ содержал главным образом водород, метан, ацетилен и другие газообразные углеводороды, а также в качестве примесей пары воды, сероводород, пары углеаммиачной соли и жидких углеводородов, углекислый газ, угарный газ CO и сернистый газ.

Полученный продукт охлаждали и пропускали через известь, воду и другие фильтры. Однако, несмотря на прохождение нескольких ступеней очистки, примеси – сероводород, продукты сгорания серы – все равно оставались и при горении определяли характерный запах светильного газа [4].

Для хранения светильного газа строили специальные сооружения огромные резервуары-газгольдеры, которые стали неотъемлемой деталью пейзажа городов, где было устроено газовое освещение. Газгольдер представлял собой плавающий в бассейне с водой железный колокол, под которым собирался газ. Колокол делался телескопическим, из 2, 3, 4 и более частей, и был похож на перевернутый дорожный складной стакан. Когда газгольдер был пуст, все его части были погружены в воду, а по мере наполнения газом они начинали подниматься. Кольцевые пазухи между частями были заполнены водой и поэтому герметичны. Газ находился в газгольдере под давлением, определяемым весом всех плавающих в воде конструкций. Газ к домашним и уличным газовым светильникам подавался из хранилищ газгольдеров по трубопроводам и шлангам.

В нынешнее время плазменные газовые светильники не утратили свою актуальность. Они кое-где применяются для уличного освещения. Так, например, в Москве газовые фонари есть в парке Воинской славы, который входит в состав территории административных зданий «Мосгаза».

Известны также портативные универсальные газовые лампы с пьезовым поджегом, предназначенные для туристов и дачников (рис. 1.27).

Лампа работает от газового баллона резьбового стандарта, но возможно и подсоединение к цанговому газовому баллону при помощи адаптера.

Резьбовой газовый баллон для туристической горелки – это сменный картридж, который присоединяется к горелке с помощью накручивания самой горелки или ее шланга на резьбу.



Рис. 1.27. Портативная газовая лампа

Цанговый (штоковый, штуцерный) баллон в народе называют дихлофосным. Он предназначен для использования в специальных мобильных кухнях (плитках) и чтобы использовать их в горелках, нужен специальный переходник, который иногда идет в комплекте с горелкой либо покупается отдельно. Цанговый баллон с более тонкими стенками, чем резьбовой, иногда мнется в месте соединения с горелкой, что создает проблемы при установке. Считается, что в цанговых баллонах топливо для горелки худшего качества.

1.6. Искусственное освещение улиц неэлектрическими плазменными источниками оптического диапазона

Первые попытки использовать искусственное освещение на городских улицах были предприняты в начале XV века. В 1417 г. лондонский мэр Генри Бартон распорядился вывешивать фонари зимними вечерами, чтобы рассеять непроглядную тьму в британской столице. В начале XVI века фонари для освещения улиц появились и в Париже: парижан обязали держать светильники у окон, которые выходят на улицу.

Одна из первых систем городского уличного освещения была создана в Амстердаме, по инициативе организатора городской пожарной охраны Яна Ван дер Хейдена. В 1668 г. он предложил установить уличные фонари, чтобы по ночам горожане не падали в неогражденные каналы, а также для борьбы с преступностью и для облегчения тушения пожаров. Очень скоро амстердамское новшество позаимствовали и другие города,

а в 1682 г. городское освещение системы Ван дер Хейдена было введено в Берлине.

Поначалу фонари давали относительно мало света, поскольку в них использовались обыкновенные свечи и масло. Применение керосина позволило значительно увеличить яркость освещения.

В России уличное освещение появилось при правлении Петра I. Чтобы отметить победу над шведами, в 1706 г. Петр I велел вывесить фонари на фасадах домов около Петропавловской крепости. В 1718 г. на петербургских улицах появились первые стационарные фонари. Регулярное уличное освещение было введено в 1723 г., когда на Невском проспекте были установлены масляные фонари.

«Днем рождения» городского освещения Москвы считается 25 октября 1730 г., когда по велению императрицы Анны Иоановны московский магистрат издал указ «О сделании для освещения в Москве стеклянных фонарей». Москвичи называли их «конопляники», так как в них горело конопляное масло. Сила света каждого «конопляника» не была больше 1–2 свечей, да и зажигали их только зимой. Но все же за один год они расходовали 11 тысяч пудов масла и 20 пудов фитиля.

В 1862 г. конопляное масло заменили керосином.

Чуть позднее появились газовые фонари, которые совершили настоящую революцию в уличном освещении. Такая их интерьерная разновидность, как газовые рожки, мирно уживалась с керосиновыми лампами. В 1807 г. газовые фонари новой конструкции были установлены на улице Пэлл-Мэлл и вскоре покорили все европейские столицы.

Что касается истории развития уличного освещения в России, то газовые фонари появились в Москве с 1867 г., а в 1932 г. последние газовые фонари уступили место электрическим. О размахе производства светильного газа и его использования для нужд освещения косвенно свидетельствует тот факт, что первый завод по его производству в России был построен в 1838 г., а еще в 1872 г. (то есть совсем незадолго до начала внедрения электрического освещения) были проведены мероприятия по устройству газового освещения Киева [2].

Газовое хозяйство Москвы начиналось с осветительного газа. Его использовали для работы фонарей, которые освещали улицы города. Некоторое время назад в 2012 г. была восстановлена эта историческая справедливость и на территории «Мосгаза» воссоздан архитектурный ансамбль газовых фонарей (рис. 1.28).



Рис. 1.28. Газовые фонари в парке Воинской славы, г. Москва, 2012 г.

На сегодня газовый фонарь по интенсивности излучения и светотдаче уступает самым современным электрическим светильникам, которые применяются в городе, но при этом у него есть одно неоспоримое преимущество – он создает удивительно комфортное освещение.

В первую очередь, газовые фонари – это наша история, антураж и красота. Недаром во многих европейских странах эти старинные светильники пользуются огромной популярностью.

Для их автономной работы специалисты использовали самую современную горелку с электророзжигом, датчиками освещенности и горения. Электропитание автоматики осуществляется от встроенного аккумулятора, который, в свою очередь, питается от встроенной в оголовок газового фонаря солнечной батареи. Днем аккумулятор заряжается от солнечной энергии, а ночью – от света самого газового светильника. Примененные технические и технологические решения прошли экспертизу промышленной безопасности.

Внешне эти светильники очень сильно напоминают своих прародителей. Чугунные колонны и оголовки фонарей были отлиты по чертежам XIX–XX веков в Санкт-Петербурге. Колбы газонакалильных ламп изготовлены из термически закаленного стекла толщиной 4–6 мм. Но есть существенное отличие в их техническом устройстве. Они полностью автоматизированы и работают не от электричества, а от солнечной энергии. Они экологичные и безопасные.

Контрольные вопросы

1. Какие естественные источники света Вы знаете?
2. Назовите наиболее типичные формы плазмы.
3. Когда и кем было открыто четвертое состояние вещества?
4. Кто ввел в термин «плазма»?
5. Какие плазменные источники излучения оптического диапазона на твердом топливе Вы знаете?
6. Как устроена свеча?
8. Какие плазменные источники излучения оптического диапазона на жидком топливе Вы знаете?
8. Опишите конструктивные особенности масляной лампы Гийома Бертрана Карселя.
9. Каково устройство керосиновой лампы?
10. Какие плазменные источники излучения оптического диапазона на газообразном топливе Вы знаете?
11. Что собой представляет газовый рожок?
12. Что собой представляет искусственное освещение улиц неэлектрическими плазменными источниками излучения оптического диапазона?

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

2.1. Люминесценция и люминофоры

Понятие «люминесценция» было введено впервые немецким физиком Густавом Генрихом Видеманом (с немецкого *Gustav Heinrich Wiedemann*, 1826–1899 гг., Берлин, Лейпциг) в 1888 г.. **Люминесценция** (от латинского *lumen* – свет и *-escent* – суффикс, означающий слабое действие) – это излучение, представляющее собой избыток над тепловым излучением тела, которое продолжается в течение времени, значительно превышающего период световых колебаний [1].

Важной особенностью люминесценции является то, что она способна проявляться при значительно более низких температурах, так как не использует тепловую энергию излучающей системы. Тепловое излучение в видимой области спектра заметно только при температуре тела в несколько сотен или тысяч градусов, в то время как люминесцировать оно может при любой температуре. Поэтому люминесценцию часто называют «холодным свечением».

Систематические количественные исследования холодного свечения были начаты 100 лет назад трудами французского физика Александра Эдмона Беккереля (с французского *Alexandre-Edmond Becquerel*, 1820–1891 гг., Париж). В установлении основных законов люминесценции, а также в развитии ее применений исключительное значение имели работы советской школы физиков под руководством академика Сергея Ивановича Вавилова (1891–1951 гг.). Значительные заслуги имеет советская научная школа люминесценции, созданная академиками С.И. Вавиловым и А.Н. Терениным, профессором В.Л. Левшиным [5].

Критерий длительности, введенный Вавиловым, позволяет отделить люминесценцию от других видов нетеплового излучения: рассеяния и отражения света, комбинационного рассеяния, излучения Черенкова. Длительность их меньше периода колебания световой волны (то есть меньше 10^{-10} с).

Физическая природа люминесценции состоит в излучательных переходах электронов атомов или молекул из возбужденного состояния в основное. При этом причиной первоначального их возбуждения могут служить различные факторы, такие как внешнее излучение, температура, химические реакции и другие.

Вещества, имеющие нелокализованные электроны, обладают самой сильной люминесценцией. Антрацен, нафталин, белки, содержащие ароматические аминокислоты, многие пигменты растений и, в частности, хлорофилл, а также ряд лекарственных препаратов обладают ярко выраженной способностью к люминесценции. Органические вещества, способные давать люминесцирующие комплексы со слабо люминесцентными неорганическими соединениями, часто используются в люминесцентном анализе.

Первоначально понятие люминесценция относилось только к видимому свету. В настоящее время оно применяется к излучению в инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

Природное применение холодного свечения – люминесценции – наблюдалось и первобытным человеком, но сознательное описание этих явлений и выяснение их способностей началось лишь около 400 лет назад. Люминесцентное свечение проявляется в природе как свечение гниющих кусков деревьев и кустарников голубоватым светом гнилушки, как величественные северные сияния, как свечение жуков и других насекомых, бактерий и различных морских животных (каракатиц, рачков, морских звезд, некоторых рыб и т.д.).

Люминесценцию можно классифицировать по типу возбуждения, механизму преобразования энергии и временным характеристикам свечения.

По виду возбуждения различают следующие виды люминесценции:

- фотолюминесценцию (возбуждение светом);
- радиолюминесценцию (возбуждение проникающей радиацией), частными случаями которой являются рентгенолюминесценция (возбуждение рентгеновскими лучами), катодолюминесценция (возбуждение электронным пучком), ионолюминесценция (возбуждение ускоренными ионами), альфа-люминесценция (возбуждение альфа-частицами) и т.д.;
- электролюминесценцию (возбуждение электрическим полем);
- триболлюминесценцию (возбуждение механическими деформациями);
- хемиллюминесценцию (возбуждение в результате химических реакций);
- кандоллюминесценцию (возбуждение при рекомбинации радикалов на поверхности).

Способность к люминесценции обнаруживают различные вещества, которые называют люминофорами. Согласно определению, *люминофоры*

(от латинского *lumen* – свет и греческого *phoros* – несущий) – это твердые и жидкие вещества, способные люминесцировать под действием различного рода возбуждений.

По химической природе различают органические люминофоры – органолюминофоры, и неорганические – фосфоры. Фосфоры, имеющие кристаллическую структуру, называются кристаллофосфорами. Наибольшее распространение получили кристаллофосфоры.

По типу возбуждения различают фотолюминофоры, рентгенолюминофоры, радиолюминофоры, катодолюминофоры, электролюминофоры.

Некоторые люминофоры могут выступать в качестве люминофоров смешанных типов (например, $ZnS \cdot Cu$ является фото-, катодо- и электролюминофором).

Свечение люминофора может быть обусловлено как свойствами основного вещества, так и наличием примеси – активатора.

Способность к люминесценции зависит как от природы люминесцирующего вещества и его фазового состояния, так и от внешних условий. При низком давлении люминесцируют пары металлов и благородные газы (это явление применяется в газоразрядных источниках света, люминесцентных лампах и газовых лазерах). Люминесценция жидких сред в основном характерна для растворов органических веществ.

Яркость люминесценции кристаллов зависит от наличия в них примесей (так называемых активаторов), энергетические уровни которых могут служить уровнями поглощения, промежуточными или излучательными уровнями. Роль этих уровней могут выполнять также энергетические зоны (валентная и проводимости).

Основой кристаллофосфоров служат сульфиды, селениды и теллуриды Zn , Cd , оксиды Ca , Mn , щелочно-галоидные и некоторые другие соединения. В состав кристаллофосфоров в малых концентрациях входят примеси – активаторы. В качестве активаторов используют ионы металлов (Cu , Co , Mn , Ag , Eu , Ti и т.д.). Активаторы и дефекты решетки кристалла (вакансии, междуузельные атомы и т.п.) образуют в основном веществе (основании) *центры свечения*. Кристаллофосфоры люминесцируют под действием света, потока электронов, проникающей радиации, электрического тока и т.д.

Способность кристаллофосфоров люминесцировать обусловлена наличием запрещенной зоны в энергетическом спектре кристалла, поэтому кристаллофосфорами могут быть только полупроводники и диэлектрики.

Кристаллофосфоры могут люминесцировать как в результате возбуждения непосредственно центров свечения, так и при поглощении энергии возбуждения кристаллической решёткой кристаллофосфора и передаче ее (через электроны, дырки и др.) центрам свечения.

Длительность послесвечения кристаллофосфора колеблется в широких пределах – от 10^{-9} с до нескольких часов. В зависимости от активатора спектр люминесценции кристаллофосфора может меняться от ультрафиолетового до инфракрасного излучения.

Синтез кристаллофосфоров осуществляется чаще всего прокаливанием твёрдой шихты, однако ряд кристаллофосфоров получают из газовой фазы или расплава. Комбинируя активаторы и основы, можно синтезировать кристаллофосфоры для преобразования различных видов энергии в видимый свет необходимых цветов с высоким коэффициентом полезного действия в несколько десятков процентов. Созданы, например, кристаллофосфоры, преобразующие инфракрасное излучение в видимое, а также кристаллофосфоры, яркость люминесценции которых возрастает или уменьшается (вспышечные и тушащиеся кристаллофосфоры) под действием инфракрасного излучения. В светотехнике люминофоры применяют для преобразования различных видов энергии в световую. В люминесцентных лампах применяются смеси кристаллофосфоров (например, смеси MgWO_4 и $(\text{ZnBe})_2 \text{SiO}_4 \cdot \text{Mn}$) или однокомпонентные люминофоры, например галофосфат кальция, активированный Sb и Mn. Люминофоры подбираются так, чтобы их свечение имело спектральное распределение, близкое к распределению дневного света. Яркость люминесценции и ее высокий энергетический выход позволили создать люминесцентные источники света с высоким коэффициентом полезного действия, основанные на электролюминесценции и фотолюминесценции (люминесцентная лампа). Благодаря таким широким возможностям, а также большой яркости свечения, химической и радиационной стойкости кристаллофосфоры используются не только в люминесцентных лампах, но и в экранах телевизоров и осциллографов, электролюминесцентных панелях и сцинтиляционных счетчиках для регистрации быстрых элементарных частиц и γ -квантов. Люминесценция широко применяется для киносъемки и в дефектоскопии. Люминесцентными красками окрашивают ткани, дорожные знаки и т.д. Светящиеся палочки – хороший пример химолюминесценции. В них циалюм в реакции с перекисью водорода производит свет.

2.2. Обобщенная характеристика газоразрядных люминесцентных ламп

На заре светотехники как науки Михаил Васильевич Ломоносов (8 ноября 1711 г., деревня Мишанинская (ныне – село Ломоносово), Архангелогородская губерния – 4 апреля 1765 г., Санкт-Петербург, Российская империя) в цикле своих экспериментов наблюдал свечение газообразных веществ под воздействием электрического тока, пропуская ток через заполненный водородом стеклянный шар. В 1856 г. Генрих Иоганн Вильгельм Гейслер (с немецкого *Johann Heinrich Wilhelm Geißler*; 1814–1879 гг., Игельшиб, Бонн, Германская империя), немецкий стеклодув, механик, физик и изобретатель, создавая газоразрядную лампу, получил синее свечение в заполненной газом трубке, которое было возбуждено при помощи соленоида. Это была первая в современной истории бесконтактная газоразрядная лампа.

В 1891 г. Никола Тесла (1856–1943 гг., Смилян, Австрийская империя, США), изобретатель в области электротехники и радиотехники сербского происхождения, инженер, физик, запатентовал систему электрического освещения газоразрядными лампами, которая включала в себя источник высокого напряжения высокой частоты и газоразрядные аргоновых ламп. Аргоновые лампы используются и в настоящее время. В 1893 г. на выставке в Чикаго, штат Иллинойс, Томас Эдисон продемонстрировал люминесцентное свечение.

В 1894 г. Даниель МакФарлан Мур создал газоразрядную лампу, в которой использовал азот и углекислый газ, испускающую розово-белый свет.

В 1901 г. Питер Купер Хьюитт (1861–1921 гг.), американский электротехник, продемонстрировал ртутную газоразрядную лампу, которая испускала свет сине-зеленого цвета, что делало ее непригодной для практического применения. Однако конструкция этой ртутной газоразрядной лампы была очень близка к современным образцам.

В 1926 г. немецкий изобретатель Эдмунд Гермер увеличил давление газа в колбе и покрыл колбу флуоресцентным порошком, который преобразовывает ультрафиолетовое излучение, испускаемое возбужденной плазмой, в световой поток белого цвета. Фирма General Electric позже купила патент Эдмунда Гермера и довела лампы дневного света до широкого коммерческого применения к 1938 г. [1].

В 1951 г. за разработку в СССР люминесцентных ламп Валентин Александрович Фабрикант (1907–1991 гг., Москва), физик, был удостоен звания лауреата Сталинской премии второй степени совместно с С.И. Вавиловым, В.Л. Лёвшиным, Ф.А. Бутаевой, М.А. Константиновой-Шлезингер, В.И. Долгополовым [5].

Современная газоразрядная люминесцентная лампа – газоразрядный источник света, в котором электрический разряд в парах ртути создает ультрафиолетовое излучение, преобразующееся в видимый свет с помощью люминофора (рис. 2.1).

По составу газов или паров, в которых происходит разряд, газоразрядные лампы делятся на лампы с разрядом: 1) в газах; 2) в парах металлов; 3) в парах металлов и их соединений. По рабочему давлению разрядные лампы делятся на: 1) лампы низкого давления – примерно от 0,1 до 10^4 Па; 2) высокого давления – от 10^4 до 10^6 Па; 3) сверхвысокого давления – больше 10^6 Па; по виду разряда – на лампы: 1) дугового, 2) тлеющего и 3) импульсного разряда [6, 7, 8, 10].

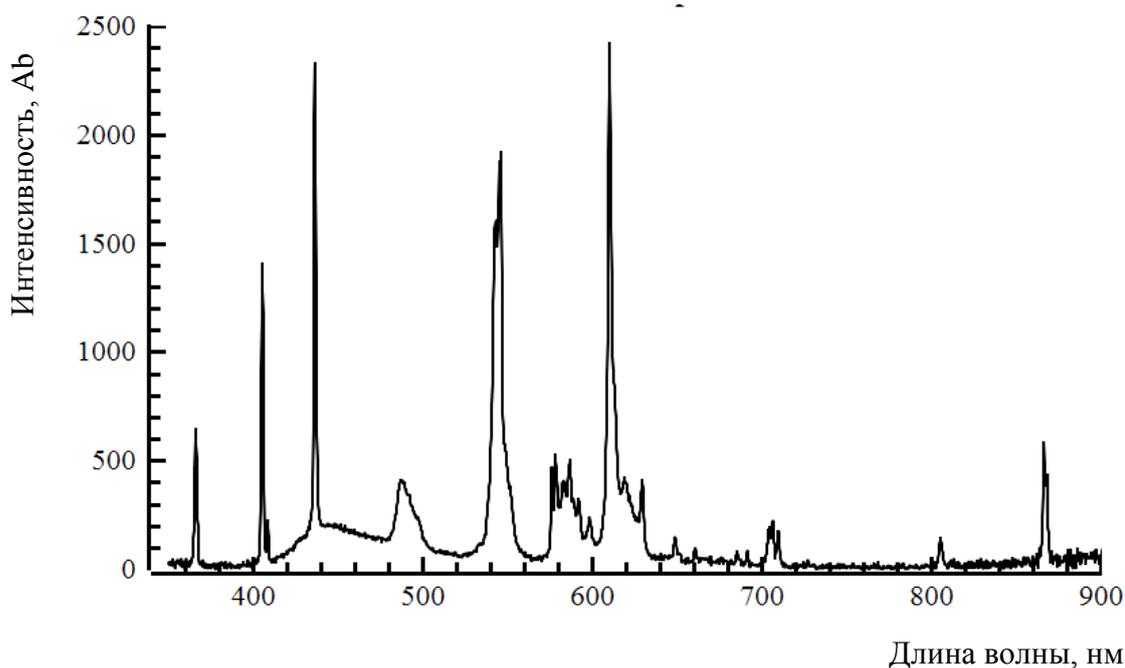


Рис. 2.1. Спектр люминесцентной лампы

К ртутным газоразрядным лампам низкого давления относятся трубчатые люминесцентные, компактные люминесцентные, кварцевые и индукционные лампы [6, 7, 8].

К ртутным газоразрядным лампам высокого давления относятся дуговые ртутные люминесцентные, металлогалагенные типа ДРИ, ксеноновые, натриевые типа ДНаТ [6, 7, 8].

Люминесцентные лампы нашли широкое применение в освещении общественных зданий: школ, больниц, офисов. С появлением компактных люминесцентных ламп с электронными балластами, которые можно включать в патроны E27 и E14 вместо ламп накаливания, люминесцентные лампы нашли применение и в быту. Люминесцентные лампы наиболее целесообразно применять для общего освещения, прежде всего помещений большой площади. Люминесцентные лампы широко применяются также и в локальном освещении рабочих мест, в световой рекламе, подсветке фасадов [7, 8, 9].

До начала применения светодиодов люминесцентные лампы являлись единственным источником для подсветки жидкокристаллических экранов.

К традиционным областям применения ламп ДРЛ относятся освещение открытых территорий, производственных, сельскохозяйственных и складских помещений [7, 8, 9].

Также существуют специальные люминесцентные лампы с различными спектральными характеристиками [8].

1. Лампы дневного света, отвечающие высоким требованиям к цветопередаче естественного цвета при дневном освещении 5400 К, служат для устранения эффекта цветовой мимикрии. Они применимы в случаях, когда нужна атмосфера живого дневного света, например, в типографиях, картинных галереях, музеях, зубоорачебных кабинетах, и лабораториях, при просмотре диапозитивов и в специализированных магазинах текстильных товаров.

2. Лампы дневного света, которые излучают свет, который по своей спектральной характеристике схож с солнечным светом. Данные лампы рекомендуются для помещений с недостатком дневного света, например для офисов, банков и магазинов. Благодаря своей очень хорошей цветопередаче и высокой температуре цвета (6500 К) они идеально подходят для сравнения красок и медицинской светотерапии.

3. Лампы дневного света для растений и аквариумов с усиленным излучением в спектральном диапазоне синего и красного света. Идеально воздействуют на фотобиологические процессы. Данные лампы с обозначениями излучают свет с минимальным содержанием ультрафиолетовой составляющей типа А (при абсолютном отсутствии ультрафиолетовых составляющих типа В и С). Обычно комбинируются с лампами дневного света (5400 К – 6700 К) для придания естественности фоновому освещению.

4. Лампы для морских обитателей аквариумов с излучением в диапазоне синего цвета и ультрафиолета. Служат для придания естественной окраски кораллов и обитателей коралловых рифов. Также данные лампы позволяют некоторым видам кораллов флуоресцировать, что в свою очередь «оживляет» композицию. Обычно комбинируются с лампами дневного света (5400 К – 6700 К) для придания естественности фонового освещения.

5. Декоративные лампы красного, желтого, зеленого, синего и малинового цветов. Цветные люминесцентные лампы особенно пригодны для декоративного освещения и создания специальных световых эффектов. Цвет лампы получают применением специального люминофора или окрашиванием колбы. Помимо прочего, люминесцентная лампа желтого цвета не содержит в своем спектре ультрафиолетовую составляющую. Поэтому эта лампа рекомендована для стерильных производств, например, для цехов по изготовлению микросхем (в подобном производстве используют фоторезисты – вещества, реагирующие с УФ), а также для общего освещения без УФ-излучения.

6. Люминесцентные лампы, предназначенные для освещения помещений, в которых содержатся птицы. Спектр этих ламп содержит ближний ультрафиолет, что позволяет создать более комфортное для них освещение, приблизив его к естественному, так как птицы, в отличие от людей, имеют четырехкомпонентное зрение.

7. Лампы, предназначенные для освещения мясных прилавков в супермаркетах. Свет этих ламп имеет розовый оттенок, в результате такого освещения мясо приобретает более аппетитный вид, что привлекает покупателей.

8. Люминесцентные лампы для соляриев и косметических салонов.

9. Ультрафиолетовые люминесцентные лампы с колбами из «черного» стекла. Различные материалы обладают способностью преобразовывать невидимое ультрафиолетовое излучение в световое (создавать эффект флуоресценции). Такие лампы представляют собой облучатели с длинноволновым ультрафиолетовым излучением, использующие данный эффект. Поэтому они являются незаменимыми источниками излучения для любых видов исследований с применением люминесцентного анализа. Эти лампы отличаются от стандартных люминесцентных ламп тем, что их колба изготовлена из специального стекла, практически непрозрачного в видимой области и пропускающего ближнее УФ-излучение, и покрыта

специальным люминофором, излучающим в узкой спектральной области около 370 нм. Такие лампы излучают электромагнитные волны практически только в длинноволновом ультрафиолетовом диапазоне от 350 до 410 нм, которые почти невидимо глазом (кроме полосы излучения люминофора в спектре имеются хорошо видимые линии 365,0153 нм и 404,6563 нм, а также линии 398,3931 нм и 407,783 нм). Практически все видимое излучение, а также более коротковолновый ультрафиолет, задерживаются стеклом светофильтра. Области применения:

- материаловедение: исследования материалов с помощью люминесценции, например выявление тончайших трещин вала двигателя;
- текстильная промышленность: анализ материалов, например химического состава и видов примесей в шерстяных материалах. Распознавание невидимых загрязнений и возможных пятен после чистки;
- пищевая промышленность: обнаружение фальсификаций в продуктах питания, мест гниения во фруктах (особенно в апельсинах), мясе, рыбе;
- криминалистика: выявление фальшивок среди банкнот, чеков и документов, а также внесенных в них изменений, удалённых пятен крови, подделок картин, обнаружение невидимых секретных надписей;
- почта: рациональная обработка корреспонденции с помощью автоматических штемпельных машин для конвертов, проверка подлинности почтовых марок; создание световых эффектов на сценах драматических и музыкальных театров, дискотеках, кафе;
- прочие области применения: реклама и оформление витрин, сельское хозяйство (например, проверка посевного материала), минералогия, проверка драгоценных камней, искусствоведение.

10. Облучатели для стерилизации и озонирования, типично с длиной волны 253,7 нм. Данные облучатели имеют благодаря своему коротковолновому УФ-излучению типа С бактерицидное воздействие и поэтому применяются для стерилизации. Рациональное применение этих облучателей гарантируется только в специальных, предназначенных для них установках. Поэтому монтаж облучателей в установки должен проводиться только изготовителем установок.

Области применения:

- стерилизация воды: в аквариумах, питьевой воды, воды для плавательных бассейнов, сточных вод;
- стерилизация и дезодорирование воздуха в кондиционерах, больницах, складских помещениях;

- стерилизация поверхностей в фармацевтической и упаковочной промышленности;

- стирание информации с микроэлектронных блоков памяти (EPROM).

11. Лампы со специальными цветовыми характеристиками. Применяются для полимеризации пластмасс, клеев, лаков, красок на глубину не более 1 мм; лечения псориаза; привлечения насекомых в ловушки.

2.3. Маркировка газоразрядных ламп

В соответствии с *маркировкой отечественных люминесцентных ламп* (ЛЛ), они делятся на осветительные общего назначения и специальные. К ЛЛ общего назначения относят лампы мощностью от 15 до 80 Вт с цветовыми и спектральными характеристиками, имитирующими естественный свет различных оттенков. При классификации ЛЛ специального назначения используют различные параметры: по мощности их разделяют на маломощные (до 15 Вт) и мощные (свыше 80 Вт); по типу разряда – на дуговые, тлеющего разряда и тлеющего сечения; по излучению – на лампы естественного света, цветные лампы, лампы со специальными спектрами излучения, лампы ультрафиолетового излучения; по форме колбы – на трубчатые и фигурные; по светораспределению – с ненаправленным светоизлучением и с направленным, например, рефлекторные, щелевые, панельные (рис. 2.2) [8, 9].

У ламп с улучшенным качеством цветопередачи после букв, обозначающих цвет, стоит буква Ц, а при цветопередаче особо высокого качества – буквы ЦЦ. Маркировка ламп тлеющего разряда начинается с букв ТЛ.

Цвет излучения ламп может быть охарактеризован цветовой температурой (T_c). Согласно формуле Планка, цветовая температура определяется как температура абсолютно черного тела, при которой оно испускает излучение того же цветового тона, что и рассматриваемое излучение [11].

Тепло-белой цветности соответствует $T_c = 2700-3000$ К; белой – $T_c = 3500$ К; холодно-белой – $T_c = 4200$ К; естественной – $T_c = 5000$ К; дневной – $T_c = 6000-6500$ К.



Рис. 2.2. Маркировка отечественных люминесцентных ламп

В маркировке ламп зарубежного производства какого-либо единства нет, каждая фирма маркирует по-своему. Так, Philips все линейные лампы обозначает TL-D, Osram – Lumilux, General Electric – F. После этих букв указывается мощность ламп (18W, 36W, 58W).

По ГОСТ 6825 в маркировке ламп не предусмотрено указание индекса цветопередачи. В отличие от этого, в маркировке всех зарубежных ламп с хорошей и отличной цветопередачей после мощности (через дробь) ставится цифра, характеризующая общий индекс цветопередачи R_a . Если $R_a = 90$, то пишется цифра 9, при $80 < R_a < 90$ – цифра 8. У ламп с удовлетворительной цветопередачей ($R_a = 50-70$) в маркировке ставится двузначное число, обозначающее код цветности.

Ведущие зарубежные фирмы часто используют в названиях ламп слова, носящие явно рекламный характер: De Lux, Super, Super de Lux.

Учитывая большой разницей в обозначении ламп, часто вводящий потребителей в заблуждение, Международная комиссия по освещению (МКО) разработала и рекомендовала всем странам для использования единую универсальную систему обозначений источников света ILCOS. В соответствии с этой системой все линейные люминесцентные лампы, в том числе и серии T5, обозначаются буквами FD, кольцевые – FC, далее указывается мощность ламп, общий индекс цветопередачи и цветовая температура [7, 8, 9].

Серия ламп T5 с диаметром колбы 16 мм выпускается в двух вариантах – «лампы с максимальной световой отдачей» (фирменное обозначение у Osram – FH, у Philips – HE) и «лампы с максимальным световым потоком» (соответственно FQ и HO). Оба варианта содержат по четыре номинала мощности: первый – 14, 21, 28 и 35 Вт, второй – 24, 39, 54 и 80 Вт. В лампах мощностью 28 и 35 Вт достигнута рекордная для люминесцентных ламп световая отдача – 104 лм/Вт. Все лампы серии T5 могут работать только с электронными аппаратами. Лампы в колбах диаметром 26 и 38 мм (T8 и T12) снабжены цоколями G13, диаметром 16 мм – G5.

2.4. Особенности конструкции и принципа действия трубчатых газоразрядных люминесцентных ламп

Трубчатая люминесцентная лампа представляет собой стеклянную трубку, по концам которой вварены стеклянные ножки с укрепленными на них электродами – спиральными нитями подогрева (рис. 2.3) [8, 9].



Рис. 2.3. Устройство газоразрядной трубчатой люминесцентной лампы:
1 – колба, 2 – стеклянная ножка, 3 – электрод, 4 – штырьки, 5 – цоколь,
6 – штенгель, 7 – инертный газ, 8 – капля ртути, 9 – люминофор

На внутреннюю поверхность трубки наносится тонкий слой кристаллического порошка – люминофора. Трубка заполнена инертным газом или смесью инертных газов (Ar, Ne, Kr) и герметично запаяна. Внутри вводится дозированное количество ртути, которая при работе лампы переходит в парообразное состояние. На концах лампы имеются цоколи с контактными штырьками для подключения лампы в цепь.

При работе люминесцентной лампы между двумя электродами, находящимися в противоположных концах лампы, горит дуговой разряд. Лампа заполнена инертным газом и парами ртути, проходящий электрический ток приводит к появлению УФ излучения. Это излучение

невидимо для человеческого глаза, поэтому его преобразуют в видимый свет с помощью явления люминесценции. Внутренние стенки лампы покрыты специальным веществом – люминофором, которое поглощает УФ излучение и излучает видимый свет. Изменяя состав люминофора, можно менять оттенок свечения лампы. В качестве люминофора используют в основном галофосфаты кальция и ортофосфаты кальция-цинка. Дуговой разряд поддерживается за счет термоэлектронной эмиссии заряженных частиц (электронов) с поверхности катода. Для запуска лампы катоды разогреваются либо пропусканием через них тока (лампы типа ДРЛ, ЛД), либо ионной бомбардировкой в тлеющем разряде высокого напряжения («лампы с холодным катодом»). Ток разряда ограничивается балластом.

Электромагнитный балласт (ЭмПРА – электромагнитный пускорегулирующий аппарат) представляет собой электромагнитный дроссель с определенным индуктивным сопротивлением (рис. 2.4), подключаемый последовательно с лампой определенной номинальной мощности (рис. 2.5).



Рис. 2.4. Электромагнитный балласт «L36A-T» завода Helvar, Финляндия

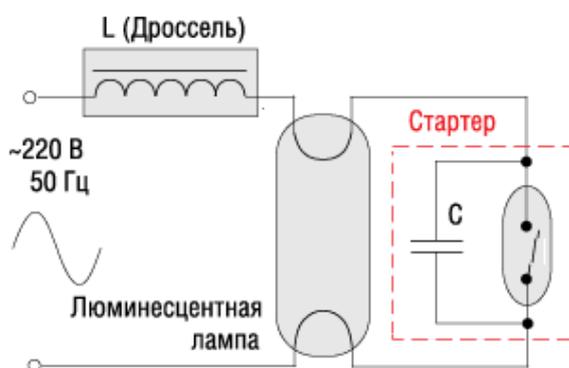


Рис. 2.5. Классическая схема электромагнитного балласта с дросселем и стартером

Последовательно нитям накала лампы подключается стартер (рис. 2.6), представляющий собой неоновую лампу с биметаллическими электродами и конденсатор (неоновая лампа и конденсатор подключены параллельно).

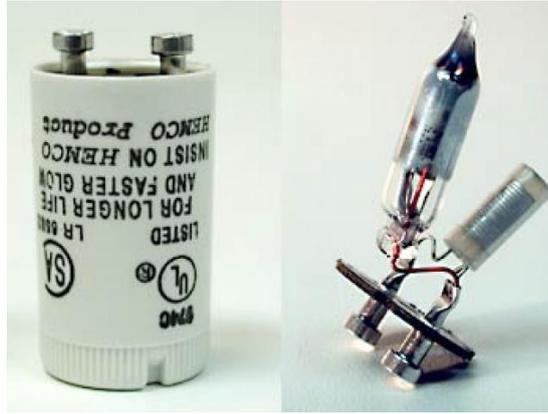


Рис. 2.6. Стартер

Холодная люминесцентная лампа имеет высокое сопротивление между электродами, поэтому при включении напряжение сети практически целиком падает на биметаллической пластине стартера (ключевом элементе). Ключевой элемент в холодном состоянии разомкнут, а в нагретом – замкнут. При включении все напряжение сети прикладывается к ключевому элементу, что вызывает ионизацию газа в колбе и разогрев биметаллической пластины. Через некоторое время ключ замыкается, в цепи резко возрастает ток, «накачивающий» энергию в дроссель. Кроме того, происходит разогрев накальных нитей люминесцентной лампы. Между разогретыми электродами газонаполненной люминесцентной лампы за счет эффекта термоэлектронной эмиссии возникает электрический ток и, как следствие, свечение люминофора. Напряжение на стартере резко уменьшается, что вызывает пропадание в нем ионизации. Биметаллическая пластина остывает, и ключ размыкается. Главными недостатками старого классического балласта являются: броски тока через холодную нить накала, механический износ и обгорание контактов ключевого элемента, что резко снижает срок службы стартера и лампы, а также приводит к выходу из строя люминесцентного светильника.

Дроссель формирует за счет самоиндукции запускающий импульс напряжением до 1 кВ, а также ограничивает ток через лампу за счет индуктивного сопротивления. В настоящее время преимуществами электромагнитного балласта являются простота конструкции, высокая надежность и долговечность. Недостатки такой схемы:

- долгий запуск (1–3 с в зависимости от степени износа лампы);
- потребление большего количества энергии дросселем по сравнению с ЭПРА (при напряжении 220 В светильник из 2 ламп по 58 Вт, то есть в сумме 116 Вт, потребляет 130 Вт);

- малый $\cos \varphi$, около 0,35–0,50 (без компенсирующих конденсаторов);
- в зависимости от качества изготовления дросселя, может иметь место низкочастотное гудение (с удвоенной частотой сети) пластин магнитопровода;
- мерцание лампы с удвоенной частотой сети (100 Гц), которое негативно может сказаться на зрении, а также вызывает стробоскопический эффект (вращающиеся синхронно с частотой сети предметы и детали станков могут казаться неподвижными). Люминесцентные лампы с электромагнитным балластом запрещается применять для освещения подвижных частей станков и механизмов, во всяком случае, без дополнительного подсвечивания лампами накаливания. Для снижения мерцания лампы в помещении разделяют на три группы, которые подключаются к разным фазам трехфазной электросети;
- большие габариты по сравнению с наиболее примитивными ЭПРА и значительная масса, несколько килограмм;
- при отрицательных температурах лампы, подключенные с использованием стартерно-дроссельной схемы, могут не зажигаться вообще.

Электронный балласт (ЭПРА – электронный пускорегулирующий аппарат) (рис. 2.7) питает лампы током с напряжением не сетевой частоты (50 Гц), а высокочастотным (25–133 кГц), в результате чего заметное для глаз мигание ламп исключено.



Рис. 2.7. Электронный пускорегулирующий аппарат Helvar 2×58W

В зависимости от модели, ЭПРА может использовать один из двух вариантов запуска ламп – «холодный» или «горячий».

При «холодном» запуске лампа зажигается сразу после включения. Такую схему лучше использовать в случае, если лампа включается и выключается редко, так как режим холодного пуска более вреден для электродов лампы.

«Горячий» запуск происходит с предварительным прогревом электродов. Лампа зажигается не сразу, а спустя 0,5–1 с, зато срок службы увеличивается, особенно при частых включениях и выключениях.

Потребление электроэнергии люминесцентными светильниками при использовании электронного балласта обычно на 20–25 % ниже. Материальные затраты (медь, железо) на изготовление и утилизацию меньше в несколько раз. Использование централизованных систем освещения с автоматической регулировкой позволяет сэкономить до 85 % электроэнергии. Существуют электронные балласты с возможностью диммирования – регулировки яркости – путем изменения скважности тока питания лампы.

В отличие от электромагнитного балласта для работы электронного балласта (рис. 2.8) обычно не требуется отдельный специальный стартер, так как такой балласт в общем случае способен сам сформировать необходимые последовательности напряжений.

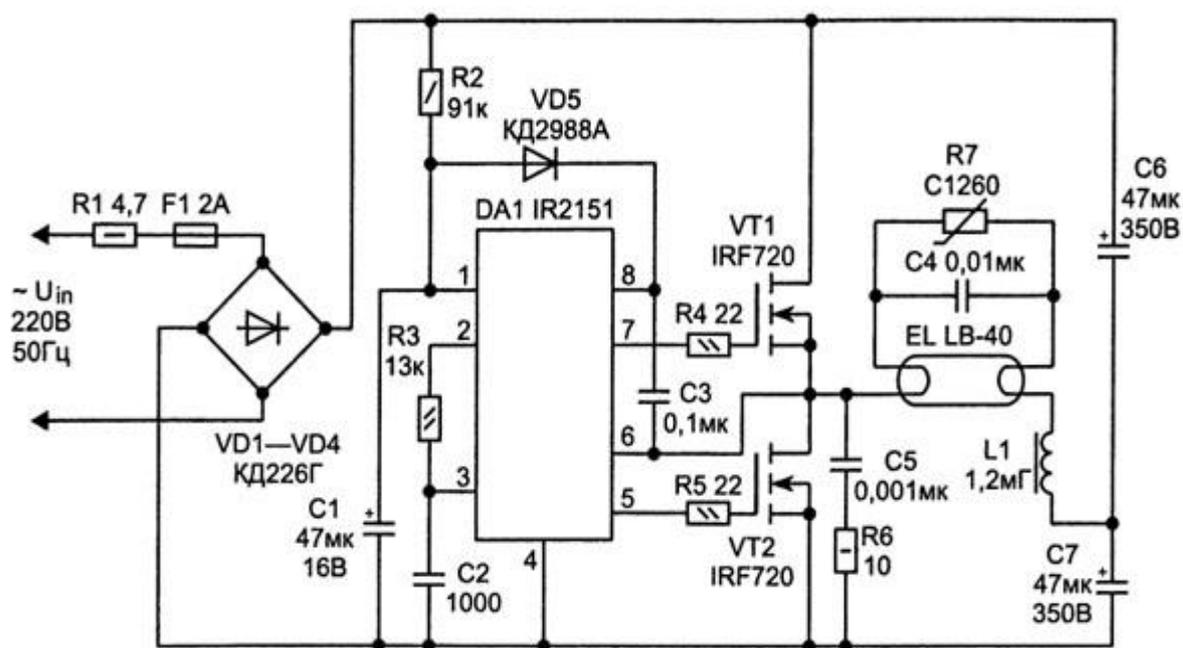


Рис. 2.8. Электрическая схема ЭПРА на микросхеме IR2151

Балласт для люминесцентной лампы на IR2151, приведенный рис. 2.8, предназначен для подключения люминесцентной лампы типа T12 или T8 мощностью 40 Вт [12]. За основу взята специализированная микросхема IR2151. Балласт построен по схеме полумостового преобразователя, имеющего среднюю точку, определенную конденсаторами C6 и C7.

Мост, построенный на диодах VD1-VD4, выпрямляет входное напряжение электросети, которое затем сглаживается конденсаторами C6 и C7. Резистор R1 предназначен для уменьшения пускового тока. Генератор импульсов, расположенный внутри микросхемы IR2151, аналогичен генератору, имеющемуся в таймере NE555.

Для большей эффективности работы балласта люминесцентной лампы необходимо, чтобы частота внутреннего генератора и частота резонансная были примерно равны. При указанных на схеме номиналах деталей резонансная частота равна примерно 40 кГц.

Через элементы R2 и C1 происходит питание микросхемы IR2151. Цепь из элементов R6 и C5 предупреждает отказ выходных каскадов IR2151 вследствие паразитных высокочастотных колебаний.

В схеме имеются электролитические конденсаторы типа K50-68, неполярные – K10-176, K73-17. Минимальное напряжение конденсатора C5 должно быть не менее 400 В. Диод VD5 обязан быть рассчитанным на обратное напряжение не менее 400 В. Им могут быть следующие диоды: BYV26D, 11DF4, BYV26C, BYV26B, HER156, HER157, HER105, SF28, HER205, HER106, HER206, SF106. Микросхему IR2151 возможно заменить на IR2153, IR2152, IR2155.

Возможна замена транзисторов: КП728, КП726, IRF730, IRF740, IRF840, КП770Д, КП751А. Термистор R7 возможно поменять на B59339-A1801-P20 или же на B59339-A1501-P20, B59320-J120-A20. Хотя иногда данный термистор можно исключить из схемы. Для этого попробуйте запустить лампу без термистора. Если она включается уверенно, без многократных вспышек, то термистор можно не устанавливать.

Существуют различные способы запуска люминесцентных ламп. Чаще всего электронный балласт подогревает катоды ламп и прикладывает к катодам напряжение, достаточное для зажигания лампы, обычно – переменное и более высокой частоты, чем сетевое, что устраняет мерцание лампы, характерное для электромагнитных балластов. В зависимости от конструкции балласта и временных параметров последовательности запуска лампы, такие балласты могут обеспечивать, например, плавный запуск лампы с постепенным нарастанием яркости до полной за несколько секунд или же мгновенное включение лампы.

Часто встречаются комбинированные методы запуска, когда лампа запускается не только за счет факта подогрева катодов лампы, но и за счет того, что цепь, в которую включена лампа, является колебательным контуром. Параметры колебательного контура подбираются так, что при отсутствии разряда в лампе в контуре возникает явление электрического

резонанса, ведущее к значительному повышению напряжения между катодами лампы. Как правило, это ведет и к росту тока подогрева катодов, поскольку при такой схеме запуска спирали накала катодов нередко соединены последовательно через конденсатор, являясь частью колебательного контура. В результате за счет подогрева катодов и относительно высокого напряжения между катодами лампа легко зажигается. Так как спирали накала катодов обладают тепловой инерцией, то есть не могут мгновенно разогреться, зажигание лампы происходит при непрогретых катодах, что ведет к сокращению срока службы. Для предотвращения этого параллельно конденсатору подключают позистор – это резистор, у которого при протекании электрического тока резко возрастает сопротивление, которое препятствует зажиганию разряда в лампе в первый момент времени, то есть когда катоды не прогреты. После зажигания лампы параметры колебательного контура изменяются, добротность уменьшается, и ток в контуре значительно падает, уменьшая нагрев катодов.

Существуют вариации данной технологии. Например, в предельном случае балласт может вообще не подогревать катоды, вместо этого приложив достаточно высокое напряжение к катодам, что неизбежно приведет к почти мгновенному зажиганию лампы за счет пробоя газа между катодами.

Дуговой разряд поддерживается за счет термоэлектронной эмиссии электронов с поверхности катода. Для запуска лампы катоды разогреваются либо пропусканием через них тока (лампы типа ДРЛ, ЛД), либо ионной бомбардировкой в тлеющем разряде высокого напряжения («лампы с холодным катодом»). Ток разряда ограничивается балластом.

Светоотдача газоразрядной люминесцентной лампы зависит от типа лампы и составляет 70-100 лм/Вт. Срок службы доходит до 15000–20000 ч.

Несмотря на более высокую эффективность люминесцентных ламп по сравнению с лампами накаливания, все равно только небольшая часть подводимой энергии преобразуется в видимое излучение (рис. 2.9). Большая часть энергии превращается в инфракрасное излучение (37 %) и рассеянное тепло (42 %).

Любая газоразрядная лампа, в том числе газоразрядная люминесцентная лампа низкого давления, в отличие от лампы накаливания, не может быть включена напрямую в электрическую сеть.



Рис. 2.9. Энергетический баланс люминесцентных ламп

Причиной этого является то, что в «холодном» состоянии люминесцентная лампа обладает высоким сопротивлением и для зажигания в ней разряда требуется импульс высокого напряжения, а после возникновения в ней разряда – имеет отрицательное дифференциальное сопротивление, поэтому, если в цепь не будет включено сопротивление, возникнет короткое замыкание и лампа выйдет из строя. Для решения этих проблем применяют специальные пускорегулирующие аппараты [8, 9].

2.5. Особенности конструкции и принципы действия компактных люминесцентных ламп

Компактная люминесцентная лампа (КЛЛ) – люминесцентная лампа, имеющая изогнутую форму колбы, что позволяет разместить лампу в светильнике меньших размеров. Такие лампы имеют встроенный электронный дроссель (рис. 2.10).

Принцип действия компактной люминесцентной лампы такой же, как у трубчатой ЛЛ, основан на преобразовании с помощью люминофора в видимый свет ультрафиолетового излучения, возникающего при электрическом разряде в парах ртути.

КЛЛ состоит из трех ключевых элементов: колба, ЭПРА, цоколь. Стеклоянная колба в виде изогнутой трубочки покрыта изнутри люминофором и заполнена инертным газом с добавлением ртути массой около 30 мг. Встречаются колбы различные по форме: спиралевидные, U-образные, шарообразные, грушевидные.

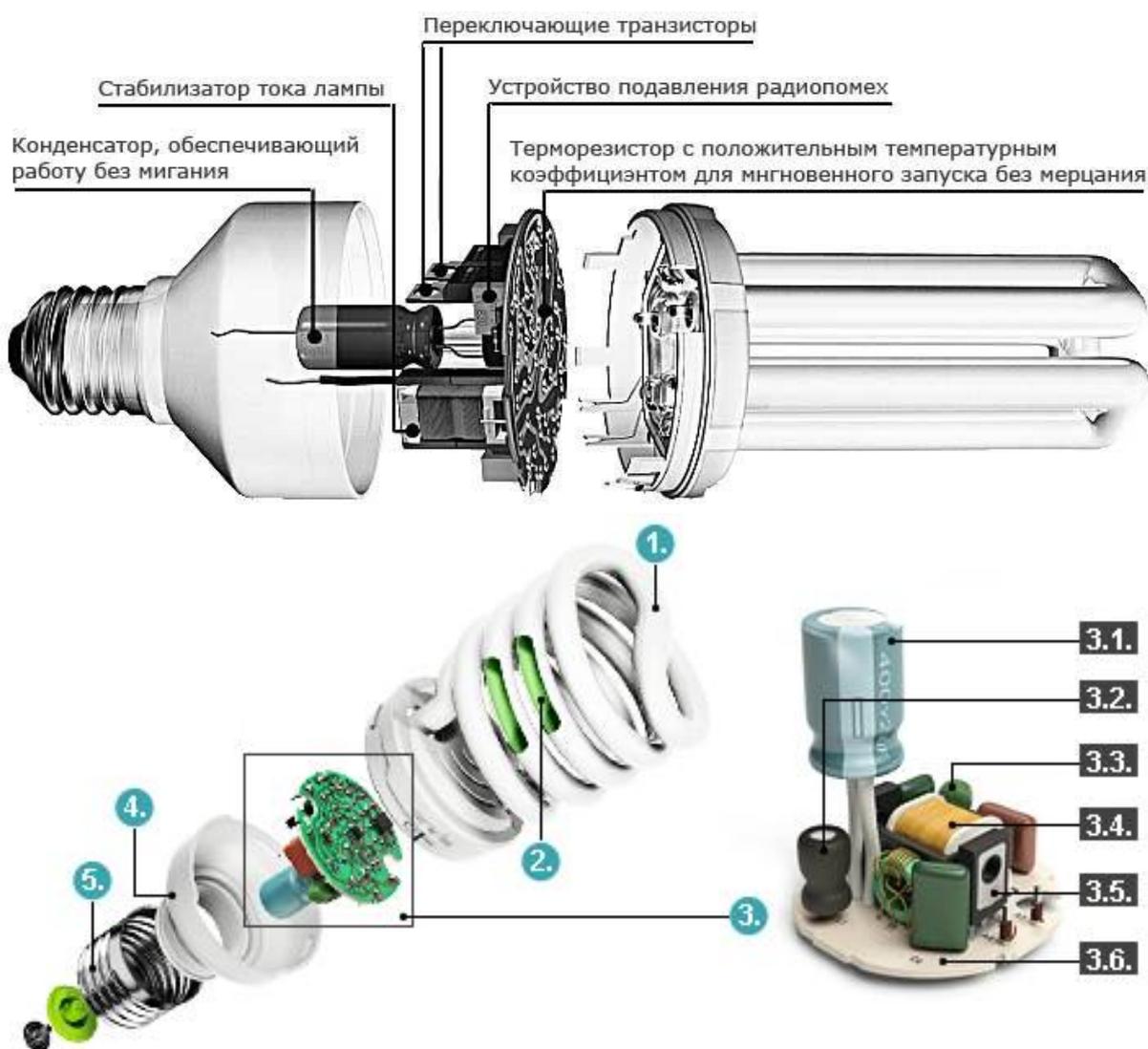


Рис. 2.10. Устройство компактной люминесцентной лампы:
 1 – колба, 2 – внутреннее покрытие, люминофор, 3 – электронный пускорегулирующий аппарат, 3.1 – конденсатор фильтра выпрямителя,
 3.2 – дроссель фильтра входного напряжения, 3.3 – позистор, 3.4 – дроссель фильтра входного напряжения, 3.5 – силовой транзистор, 3.6 – монтажная плата,
 4 – вентиляционное отверстие, 5 – цоколь

Для возникновения дуги в газоразрядной среде колбы КЛЛ необходимо электрическое напряжение до 1000 В. В процессе работы электрическая проводимость газоразрядного промежутка непостоянна, молниеносно увеличивается, что приводит к многократному увеличению сила тока, протекающего в колбе. Автоматическое управление этими процессами осуществляется с помощью ЭПРА. Внутри колбы КЛЛ расположены электроды из сплава вольфрама, покрытого смесью стронция, кальция и бора [8, 9].

Очень часто КЛЛ именуют энергосберегающими, что отчасти верно, но не корректно. Существуют и другие источники света, превосходящие их по светоотдаче, сроку службы и энергоэффективности, например металлогалогенные и светодиодные лампы.

Качество и долговечность разрядной трубки определяется ее катодами и светоизлучающим люминофором. А качество электронного балласта – схемотехническим решением и надежностью элементов – электронных компонентов. У некачественной КЛЛ могут возникнуть следующие проблемы. Уже после 1000–2000 ч работы светоотдача падает в 2–3 раза. При этом индекс цветопередачи у дешевого люминофора уже изначально очень низкий. Низкое качество эмиссионного слоя катодов приводит к загрязнению люминофора, то есть уменьшается светоотдача люминофора. А сами катоды очень быстро теряют свои эмиссионные свойства, что приводит к увеличению напряжения поджига и перегрузки электронного балласта. В результате чего либо обрываются катоды, либо выходит из строя электронный балласт. Электронный балласт является одной из основных частей компактной люминесцентной лампы, которая отвечает за ее стабильную работу. У некачественных балластов занижена мощность, выдаваемая в лампу. Отсутствует режим предварительного прогрева катодов, низкая надежность всех элементов электронной схемы.

Для более детального обзора обратимся к принципиальной схеме на рис. 2.11. Данная схема является наиболее распространенной и используется во многих КЛЛ и электронных балластах.

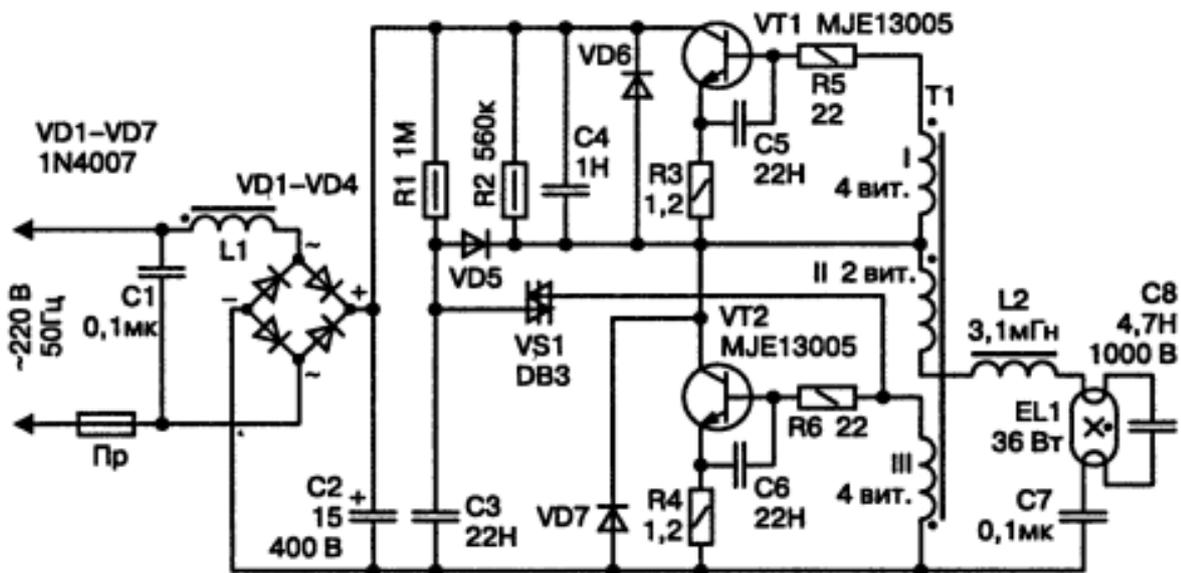


Рис. 2.11. Распространенная схема электронного балласта на дискретных элементах

Наиболее часто выходят из строя силовые ключи транзисторы VT1, VT2. Вместо транзистора типа 13005 в корпусе Т0-220 довольно часто можно встретить маломощные транзисторы типа 13002 в корпусе Т0-92, что отрицательно сказывается на надежности балласта.

При выходе из строя транзисторов VT1, VT2 обрываются также резисторы R3-R6. При замене транзисторов резисторы R3-R6 следует проверить на обрыв и при необходимости заменить. Следующим ненадежным элементом является конденсатор С8. Если при перегорании транзисторов и элементов обвязки это видно невооруженным взглядом – вздутие, почернение корпуса, то при обрыве конденсатора С8 визуально он выглядит исправным. Дело в том, что часто в балласты устанавливают конденсаторы С8 с напряжением 630 В и при старении лампы, когда повышается напряжение поджига, этот конденсатор не выдерживает и обрывается. Для проверки следует использовать измеритель емкости. А для повышения надежности электронного балласта его следует заменить на отечественный К78-2 с напряжением 1000–1600В или на аналогичный импортный с качественным диэлектриком.

Также часто выходит из строя электролитический конденсатор С2. У него наблюдается вздутие, потеря емкости. К этому элементу тоже предъявляются жесткие требования по качеству. Он должен быть высокотемпературным. Внутренний объем КЛЛ довольно часто прилично нагревается, особенно это заметно при отсутствии вентиляционных отверстий и при эксплуатации КЛЛ колбой вниз. Цепочка запуска R1, VS1 выходит из строя гораздо реже. Но при исправности всех элементов и отсутствии генерации на нее следует обратить внимание.

Таким образом, чтобы уменьшить затраты на ремонтные работы, необходимо пользоваться КЛЛ с электронными балластами известных производителей, таких как, например, OSRAM и PHILIPS.

Компактные люминесцентные лампы разработаны для применения в конкретных специфических типах светильников либо для замены ламп накаливания в обычных. Часто компактные люминесцентные лампы называют энергосберегающими лампами, что не совсем точно, поскольку существуют энергосберегающие лампы и на других физических принципах, например светодиодные или люминесцентные лампы линейного типа с пониженным содержанием ртути и меньшим диаметром трубки. Также выпускаются лампы с шарообразной колбой без спиралей накаливания.

2.6. Особенности конструкции и принципа действия кварцевых ламп

Кварцевая лампа – электрическая ртутная газоразрядная лампа с колбой из кварцевого стекла, предназначенная для получения ультрафиолетового излучения (рис. 2.12) [7, 8, 9].

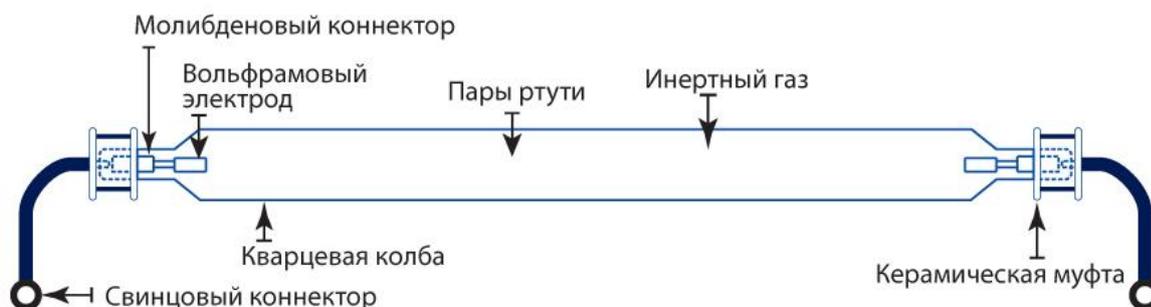


Рис. 2.12. Ультрафиолетовая кварцевая лампа

В спектрофотометрии, где методы анализа основаны на поглощении монохроматического излучения, ультрафиолетовые лампы применяют в качестве эталонных источников излучения.

В медицине кварцевая лампа предназначена для общих и внутривполостных облучений в эффективном спектральном диапазоне излучения 205–315 нм (УФС-диапазон) при воспалительных заболеваниях в оториноларингологии в лечебных, лечебно-профилактических, санаторно-курортных учреждениях, а также на дому по рекомендации врача.

В современной промышленности применяется большое количество материалов с ультрафиолетовой полимеризацией.

В ультрафиолетовых аппаратах, предназначенных для сушки, устанавливаются лампы удельной мощностью от 80 до 240–300 Вт/см. Для полимеризации лаков достаточно удельной мощности в 80 Вт/см. Для работы с трафаретными ультрафиолетовыми красками и лаками используются лампы удельной мощностью 120 Вт/см. Для сушки ультрафиолетовых красок с катионным механизмом отверждения требуются более мощные ультрафиолетовые лампы, чем для сушки радикальных ультрафиолетовых красок. Доля ультрафиолетового излучения в эмиссии лампы обычно не превышает 15–23 %. Остальные 75–85 % излучения приходится на видимый свет и ИК-лучи. Кварцевое стекло и рефлекторы поглощают до 20–30 % УФ излучения, что уменьшает КПД ультрафиолетовой сушки до 10–18 %.

Требуемый для полимеризации ультрафиолетовых красок спектр излучения лампы зависит от спектральной чувствительности входящих в состав краски фотоинициаторов и спектрального поглощения пигментами. Ртутные ультрафиолетовые лампы эмитируют максимум ультрафиолетового излучения в диапазонах 220–320 и 365 нм. Поскольку лаки и краски ультрафиолетовой полимеризации имеют свойство поглощать коротковолновое ультрафиолетовое излучение, не позволяя ему проникать вглубь красочного слоя, волны длиной 220–320 нм инициируют реакцию фотополимеризации в основном на поверхности краски, а вглубь слоя проникают волны длиной 365 нм. Ртутные ультрафиолетовые лампы являются оптимальным источником излучения для сушки тонких слоёв красок при печати струйным, офсетным и флексографским способами. Однако для некоторых красок применять ртутные ультрафиолетовые лампы нецелесообразно. Например, белый пигмент (диоксид титана) характеризуется высоким поглощением коротких, средних и значительной части длинных волн ультрафиолетового излучения и пропускает волны с длиной 400–430 нм. Поэтому для сушки белил используют ртутные УФ-лампы с добавкой галлия, которые имеют один из пиков излучения на стыке ультрафиолетового и фиолетового диапазонов спектра. Для сушки толстых слоев краски, например трафаретных отпечатков, а также красок черного, синего, зеленого и красного цветов эффективно применение ртутной ультрафиолетовой лампы с добавкой паров железа. При выборе источника излучения следует учитывать, что ртутные ультрафиолетовые лампы с добавками паров металлов испускают на 35–40 % больше ИК-излучения, чем ртутные ультрафиолетовые лампы без добавок, что делает нежелательным использование первых при печати на термочувствительных материалах [9,10].

2.7. Особенности конструкции и принципа действия индукционных ламп

Индукционная лампа – это безэлектродная газоразрядная лампа (рис. 2.13), в которой первичным источником света служит плазма, возникающая в результате ионизации газа высокочастотным магнитным полем. Для создания магнитного поля баллон с газом лампы размещают рядом с катушкой индуктивности [8, 9].

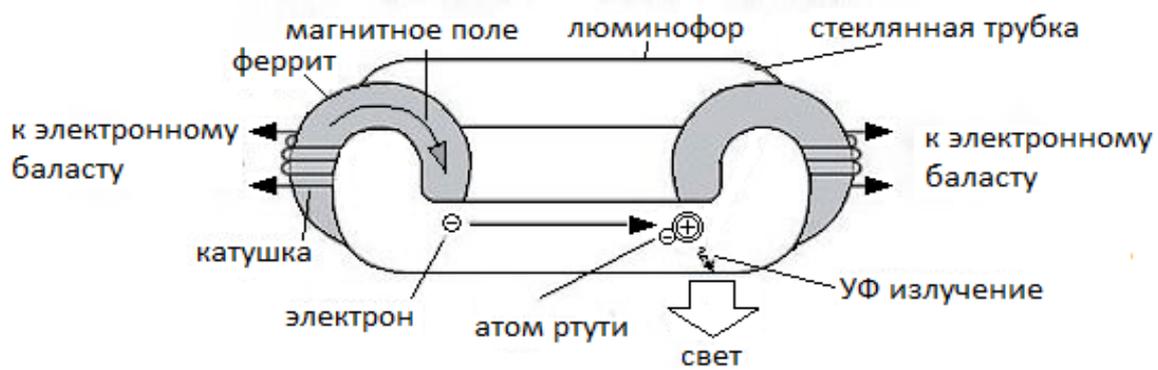


Рис. 2.13. Устройство индукционной лампы

Индукционная лампа состоит из:

- газоразрядной трубки, внутренняя поверхность которой может быть покрыта люминофором для получения видимого света;
- катушки (первичной обмотки трансформатора), у которой полость лампы является вторичным витком;
- электронного генератора высокочастотного тока для запитывания катушки;
- ферромагнитный экран и сердечники – для уменьшения рассеяния высокочастотного магнитного поля (не всегда).

Индукционные лампы по принципу действия несколько отличны от более традиционных линейных трубчатых и компактных люминесцентных ламп. Электронный генератор индукционных ламп вырабатывает высокочастотный ток, протекающий по обмотке накачки лампы. Вторичная «обмотка» трансформатора короткозамкнутая, это ионизированный газ трубки. При достижении напряженности электрического поля в газе, достаточной для электрического пробоя, газ превращается в низкотемпературную плазму. Так как плазма хорошо проводит электрический ток, в газовой полости лампы начинает выделяться энергия от протекания электрического тока и поддерживается устойчивый плазменный шнур. Возбужденные электрическим разрядом атомы газа, наполняющего полость лампы, излучают фотоны с длинами волн, характерными для атомов наполняющего лампу газа (эмиссионные линии спектра). Обычно эти лампы наполняют смесью аргона с парами ртути. Аргон добавляют для облегчения зажигания лампы при низких температурах, когда давление паров ртути недостаточно для возникновения газового разряда. Атомы ртути в газовом разряде ярко излучают в эмиссионных линиях в невидимой глазом ультрафиолетовой части

спектра. Если необходимо, ультрафиолетовое излучение атомов ртути преобразуется в видимое излучение посредством люминофора, нанесенного на внутреннюю поверхность стеклянной трубки лампы. Такие лампы можно отнести к люминесцентным лампам.

По способу размещения индукционной катушки, эти лампы делятся на лампы с внешней индукцией, когда катушка расположена вокруг трубки, и с внутренней индукцией, когда катушка с магнитным сердечником находится внутри колбы (рис. 2.14, 2.15). Кроме того, бывают лампы с отдельным балластом и лампы со встроенным балластом.



Рис. 2.14. Индукционная лампа с магнитным сердечником снаружи колбы



Рис. 2.15. Индукционная лампа с магнитным сердечником внутри колбы

В любом случае, индукционная лампа представляет собой ВЧ трансформатор ($F = 2,65$ мГц или 190–250 кГц), где вторичная обмотка – это ВЧ разряд в колбе лампы, а первичная обмотка через электронный балласт подсоединена к сети 220/380В.

Индукционные лампы выпускаются на мощности 15, 20, 40, 80, 120, 150, 200, 300, 500 Вт. Есть еще более мощные лампы промышленного назначения. Существуют все обычные формы для любых светильников с патронами E14, E27, E40 и специальные кольцевые лампы [8, 9]. Такие лампы могут работать в сетях как переменного, так и постоянного тока.

Существенным преимуществом индукционных ламп перед просто люминесцентными лампами является отсутствие электродов. Это делает баллон лампы однородным и равномерно нагруженным по температуре. При длительной работе не происходит растрескивания баллона вокруг электродов и материал электрода не осаждается на баллоне лампы.

Поэтому даже после длительной работы индукционные лампы сохраняют уровень светового потока 80–90 % от первоначального. Для сравнения, привычные нам лампы дневного света теряют к «концу жизни» до 50–60 % первоначальной яркости, то есть имеют уровень светового потока 40 % от первоначального. На их баллонах образуются черные непрозрачные круги вдоль баллона и вокруг электродов.

2.8. Особенности конструкции и принципа действия ламп типа ДРЛ

Лампы типа ДРЛ – это дуговые ртутные люминесцентные газоразрядные лампы высокого давления [8, 9].

Первые лампы ДРЛ изготавливались двухэлектродными. Для зажигания таких ламп требовался источник высоковольтных импульсов. В качестве него применялось устройство ПУРЛ-220 (пусковое устройство ртутных ламп на напряжение 220 В). Электроника тех времен не позволяла создать достаточно надежных зажигающих устройств, а в состав ПУРЛ входил газовый разрядник, имевший срок службы меньший, чем у самой лампы. Поэтому в 1970-х гг. промышленность постепенно прекратила выпуск двухэлектродных ламп. На смену им пришли четырехэлектродные, не требующие внешних зажигающих устройств.

Для согласования электрических параметров лампы и источника электропитания практически все виды разрядных ламп, имеющие падающую внешнюю вольт-амперную характеристику, нуждаются

в использовании пускорегулирующего аппарата, в качестве которого в большинстве случаев используется дроссель, включенный последовательно с лампой (рис. 2.16).

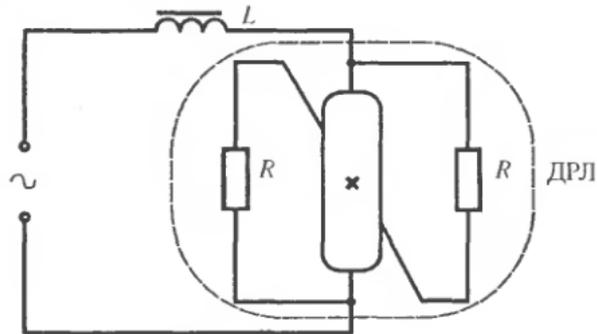


Рис. 2.16. Простейшая схема включения четырехэлектродной лампы типа ДРЛ

Четырехэлектродная лампа ДРЛ (рис. 2.17) состоит из внешней стеклянной колбы 1, снабженной резьбовым цоколем 7.

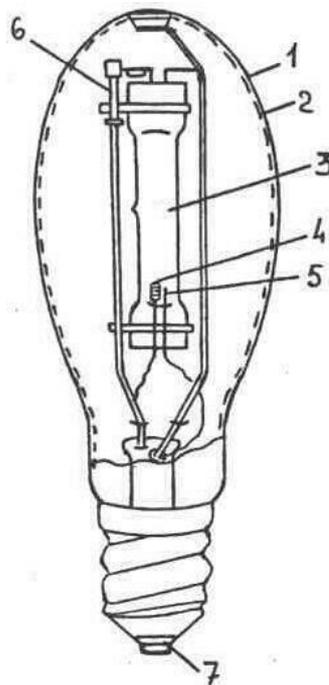


Рис. 2.17. Устройство лампы ДРЛ:

1 – колба, 2 – люминофор, 3 – кварцевая трубка (горелка), 4 – два основных вольфрамовых электрода, 5 – два дополнительных (поджигающих) электрода, 6 – резистор, 7 – цоколь

На ножке лампы смонтирована установленная на геометрической оси внешней колбы кварцевая горелка – разрядная трубка 3, наполненная аргоном с добавкой ртути. Четырехэлектродные лампы имеют основные

электроды 4 и расположенные рядом с ними вспомогательные (зажигающие) электроды 5. Каждый зажигающий электрод соединен с находящимся в противоположном конце разрядной трубки основным электродом через токоограничивающее сопротивление резистора 6. Вспомогательные электроды облегчают зажигание лампы и делают ее работу в период пуска более стабильной. Проводники в лампе изготавливаются из толстой никелевой проволоки [8, 9].

Процесс зажигания лампы ДРЛ, оснащенной зажигающими электродами, выглядит следующим образом. При подаче на лампу питающего напряжения между близко расположенными основным и зажигающим электродами возникает тлеющий разряд, чему способствует малое расстояние между ними, которое существенно меньше расстояния между основными электродами, следовательно ниже и напряжение пробоя этого промежутка. Возникновение в полости разрядной трубки большого числа носителей заряда – свободных электронов и положительных ионов – способствует пробоя промежутка между основными электродами и зажиганию между ними тлеющего разряда, который практически мгновенно переходит в дуговой. Стабилизация электрических и световых параметров лампы наступает через 10–15 минут после включения. В течение этого времени ток лампы существенно превосходит номинальный и ограничивается только сопротивлением пускорегулирующего аппарата. Продолжительность пускового режима сильно зависит от температуры окружающей среды – чем холоднее, тем дольше будет разгораться лампа.

Электрический разряд в горелке ртутной дуговой лампы создает видимое излучение голубого или фиолетового цвета, а также мощное ультрафиолетовое излучение. Последнее возбуждает свечение люминофора, нанесённого на внутренней стенке внешней колбы лампы. Красноватое свечение люминофора, смешиваясь с бело-зеленоватым излучением горелки, дает яркий свет, близкий к белому.

Изменение напряжения питающей сети в большую или меньшую сторону вызывает изменение светового потока: отклонение питающего напряжения на 10–15 % допустимо и сопровождается соответствующим изменением светового потока лампы на 25–30 %. При уменьшении напряжения питания менее 80 % номинального, лампа может не зажечься, а горящая – погаснуть.

При горении лампа сильно нагревается. Это требует использования в световых приборах с дуговыми ртутными лампами термостойких проводов, предъявляет серьезные требования к качеству контактов патронов. Поскольку давление в горелке горячей лампы существенно

возрастает, увеличивается и напряжение ее пробы. Величина напряжения питающей сети оказывается недостаточной для зажигания горячей лампы, поэтому перед повторным зажиганием лампа должна остыть. Этот эффект является существенным недостатком дуговых ртутных ламп высокого давления: даже весьма кратковременный перерыв электропитания гасит их, а для повторного зажигания требуется длительная пауза на остывание.

Ртутные лампы высокого давления с люминофором выпускаются мощностью 80, 125, 250, 400, 700 и 1000 Вт; изредка встречаются лампы мощностью 50 и 2000 Вт. Лампы мощностью 50, 80 и 125 Вт выпускаются с цоколем E27, более мощные – с цоколем E40. Потери мощности в дросселях, как правило, составляют не больше 10 %. Световая отдача современных ламп – от 40 до 60 лм/Вт; срок службы – до 24000 ч [8, 9]. По этим параметрам ртутные лампы высокого давления значительно превосходят лампы накаливания, что и предопределило их очень широкое распространение.

Кроме высокой световой отдачи и большого срока службы, ртутные лампы высокого давления имеют и другие достоинства: относительная компактность; простота включения; широкий диапазон мощностей; очень слабая зависимость параметров от окружающей температуры.

Недостатки таких ламп:

1. Низкое качество цветопередачи ($Ra = 45-50$; у иностранных ламп Delux и Super Delux – не выше 55).
2. Большие пульсации светового потока (65–75 %).
3. Большое время разгорания (до 10 минут).
4. Невозможность повторного включения горячей лампы (снова включить ее можно только после остывания горелки).
5. Высокая температура на внешней колбе (250–300 °С).

Ртутные лампы высокого давления широко применяются там, где не требуется качество цветопередачи, – в уличном освещении, на складах, на промышленных предприятиях.

2.9. Особенности конструкции и принципа действия металлогалогенных ламп

Металлогалогенные лампы бывают двух видов – с кварцевой горелкой (лампы ДРИ) и керамической горелкой (лампы ДРИК).

Металлогалогенные лампы типа ДРИ – это дуговые ртутные лампы с излучающими добавками. МГЛ (рис. 2.18) конструктивно схожи с ДРЛ, однако в ее горелку дополнительно вводятся строго дозированные

порции специальных добавок – галогенидов некоторых металлов, например натрия, таллия, индия, за счет чего значительно увеличивается световая отдача, достигающая 70–95 лм/Вт [8, 9].

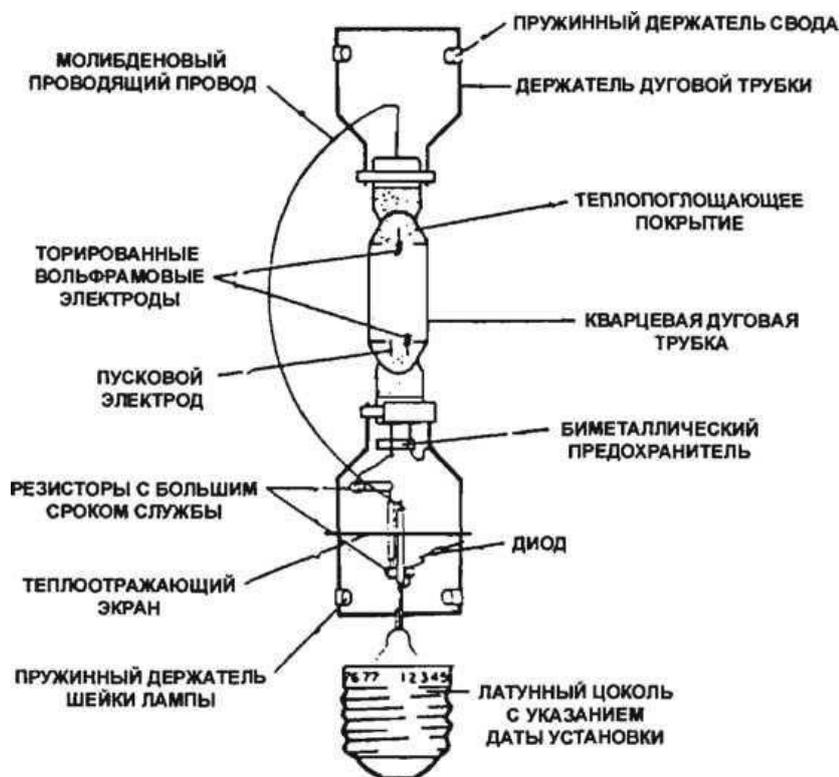


Рис. 2.18. Металлогалогенная лампа

Лампы имеют колбы эллипсоидной и цилиндрической формы, внутри которой размещается кварцевая или керамическая горелка. Срок службы составляет до 8–10 тыс. ч. Светящимся телом МГЛ высокого давления является плазма дугового электрического разряда. Основным элементом наполнения разрядной трубки МГЛ является инертный газ, как правило, аргон Ar и ртуть Hg. Помимо них в газовой среде наполнения присутствуют галогениды некоторых металлов, обычно иодид натрия и иодид скандия. В холодном состоянии галогениды в виде тонкой пленки конденсируются на стенках разрядной трубки. При высокой температуре дугового разряда происходит испарение этих соединений, диффузия паров в область столба дугового разряда и разложение на ионы. В результате ионизированные атомы металлов возбуждаются и создают оптическое излучение.

В современных лампах ДРИ используются в основном керамические горелки, обладающие большей стойкостью к реакциям с их функциональным веществом, благодаря чему со временем горелки затемняются гораздо меньше кварцевых. Еще одно отличие современных

ДРИ – шаровидная форма горелки, позволяющая снизить спад светоотдачи, стабилизировать ряд параметров и увеличить яркость «точечного» источника. Различают два основных исполнения данных ламп: с цоколями E27, E40 и софитное – с цоколями типа *Rx7S* и подобными им. Изменяя состав примесей в лампах ДРИ, можно добиться «монохроматических» свечений различных цветов (фиолетового, зеленого). Благодаря этому ДРИ широко используются для архитектурной подсветки. Лампы ДРИ с индексом «12» (с зеленоватым оттенком) используют на рыболовецких судах для привлечения планктона.

Лампы ДРИЗ – дуговые ртутные с излучающими добавками и зеркальным слоем – представляют собой обычную лампу ДРИ, часть колбы которой изнутри частично покрыта зеркальным отражающим слоем, благодаря чему такая лампа создает направленный поток света. По сравнению с применением обычной лампы ДРИ и зеркального прожектора, уменьшаются потери за счет уменьшения переотражений и прохождений света через колбу лампы. Так же получается высокая точность фокусировки горелки. Для того чтобы после вворачивания лампы в патрон направление излучения ее можно было изменить, лампы ДРИЗ снабжают специальным цоколем [8, 9].

Для зажигания ламп ДРИ необходим пробой межэлектродного пространства импульсом высокого напряжения. В «традиционных» схемах включения данных ламп помимо индуктивного балластного дросселя используют импульсное зажигающее устройство.

2.10. Особенности конструкции и принципа действия ламп типа натриевых газоразрядных ламп

Натриевая газоразрядная лампа (рис. 2.19) – это электрический источник света, светящимся телом которого служит газовый разряд в парах натрия. Поэтому преобладающим в спектре таких ламп является резонансное излучение натрия; лампы дают яркий оранжево-желтый свет. Эта специфическая особенность натриевой лампы (монохроматичность излучения) вызывает при освещении ими неудовлетворительное качество цветопередачи. Из-за особенностей спектра и существенного мерцания на удвоенной частоте питающей сети натриевые лампы применяются в основном для уличного освещения, утилитарного, архитектурного и декоративного [8, 9].

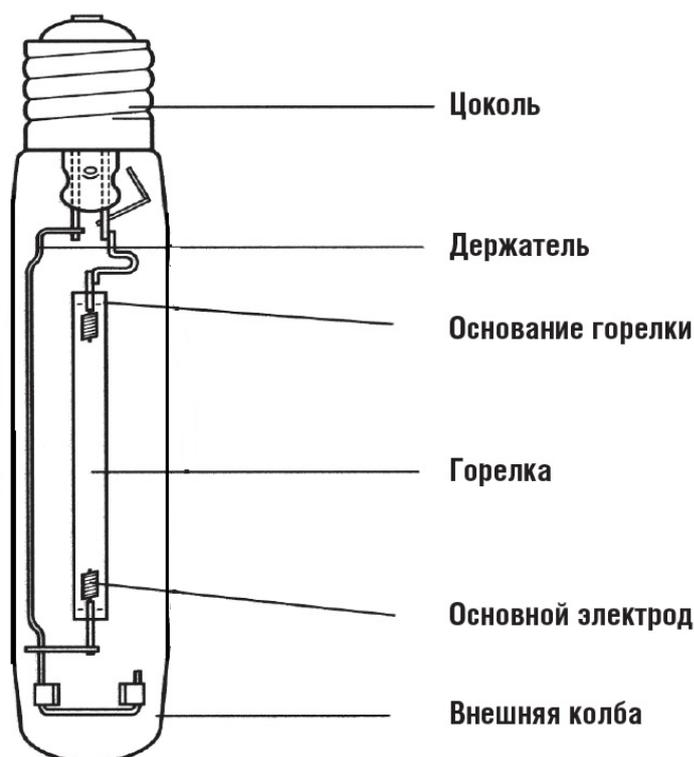


Рис. 2.19. Натриевая газоразрядная лампа высокого давления

Несмотря на свои недостатки, натриевые лампы являются одним из самых эффективных электрических источников света. Светоотдача натриевых ламп высокого давления достигает 150 лм/Вт, низкого давления – 200 лм/Вт. Светоотдача натриевых ламп положительно коррелирует с их мощностью (рис. 2.20). Срок службы натриевой лампы достигает 28,5 тыс. ч [8, 9].

В отечественной номенклатуре источников света существует ряд типов натриевых ламп высокого давления:

- ДНаТ – дуговые натриевые трубчатые – в цилиндрической колбе;
- ДНаС – дуговые натриевые в светорассеивающей колбе. Горелка таких ламп помещена в эллиптическую внешнюю колбу, аналогичную лампам ДРЛ, но вместо люминофора изнутри покрытую тонким слоем светорассеивающего пигмента, что позволяет использовать эти лампы в светильниках или других осветительных установках, предназначенных для ламп ДРЛ, без ухудшения их оптических характеристик. Кроме того, горелки наполняются смесью Пеннинга (в качестве буферного газа, вместо ксенона), для облегчения зажигания;
- ДНаМТ – дуговые натриевые матированные;
- ДНаЗ – дуговые натриевые зеркальные – производятся в различных модификациях. Мелкими партиями выпускаются лампы в колбе, аналогичной ДРИЗ, где горелка размещается аксиально (на геометрической оси отражателя).

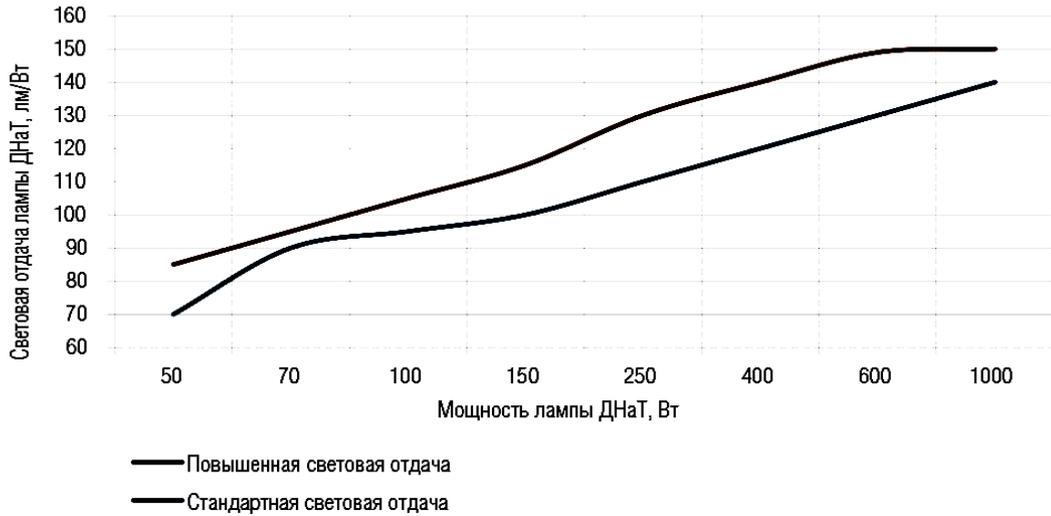


Рис. 2.20. Зависимость световой отдачи лампы ДНаТ от ее мощности

Электрические параметры натриевых ламп высокого давления и ДРЛ одинаковой мощности заметно отличаются друг от друга, поэтому работа этих источников света с одинаковыми пускорегулирующими аппаратами (ПРА) невозможна. Конструкция горелки натриевых ламп высокого давления исключает возможность встраивания в них зажигающих электродов, подобно лампам ДРЛ. Из-за этого для зажигания натриевых ламп высокого давления необходим пробой межэлектродного пространства импульсом высокого напряжения. Для этого в состав ПРА включается специальное импульсное зажигающее устройство, конструктивно оформленное в виде отдельного блока, включенное параллельно конденсатору (рис. 2.21).

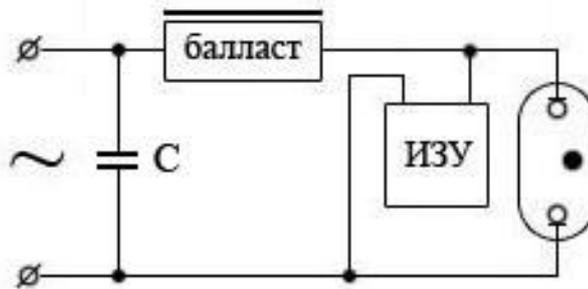


Рис. 2.21. Простейшая схема включения натриевых ламп высокого давления

В мировой практике натриевые лампы высокого давления, требующие использования импульсного зажигающего устройства, маркируются буквой «Е» в треугольной рамке. [9, 18]

Лампы ДНаТ – надежный, проверенный временем тип лампы, который применяется по всему миру для освещения улиц, автомобильных

дорог и тепличных хозяйств. Основное его преимущество – это высокая энергоэффективность и низкая цена. Благодаря этому данный тип лампы еще долго будет составлять конкуренцию всем инновационным источникам света, в том числе и светодиодам.

2.11. Особенности конструкции и принципа действия ксеноновых ламп

Ксеноновая лампа – это газоразрядный источник света высокого давления. Различают лампы с колбой в виде шара либо лампы с цилиндрической колбой. Конструкция первых представляет собой баллон, состоящий из толстостенного кварцевого стекла и двух вольфрамовых электродов легированных торием. Колба наполняется ксеноном, давление которого может подниматься до 25 атмосфер. Работают ксеноновые лампы с шаровидной колбой от постоянного либо от переменного тока. Кварцевое стекло – это единственный экономически приемлемый оптически прозрачный материал, который выдерживает высокое давление. Для специальных задач применяют изготовление колбы лампы из сапфира. Это расширяет спектральный диапазон излучения в сторону коротковолнового ультрафиолета и также приводит к увеличению срока службы лампы. Легирование электродов торием сильно увеличивает эмиссию ими электронов. В ксеноновой лампе анод при работе очень сильно нагревается потоком электронов, поэтому лампы большой мощности нередко имеют жидкостное охлаждение. Так как коэффициенты теплового расширения кварцевого стекла и вольфрама различаются, вольфрамовые электроды вварены в полосы из молибдена или инвара (инвар – сплав, состоящий из никеля (36 %) и железа), которые вплавлены в колбу [8, 9].

Для повышения эффективности лампы ксенон находится в колбе под высоким давлением (до 30 атм), что накладывает особые требования по безопасности. При повреждении лампы осколки могут разлететься с огромной скоростью. Обычно лампа транспортируется в специальном пластиковом контейнере, который снимается с лампы только после установки лампы на место и надевается на лампу при её демонтаже. При работе лампы колба подвергается значительным перепадам температуры, в результате чего к концу срока службы колба становится более хрупкой. Из соображений безопасности производители ксеноновых дуговых ламп рекомендуют использовать защитные очки при обслуживании лампы. При замене ламп рекомендуется надевать защитный костюм.

Наиболее распространены короткодуговые лампы (рис. 2.22). В них электроды расположены на небольшом расстоянии, а колба имеет шарообразную форму.

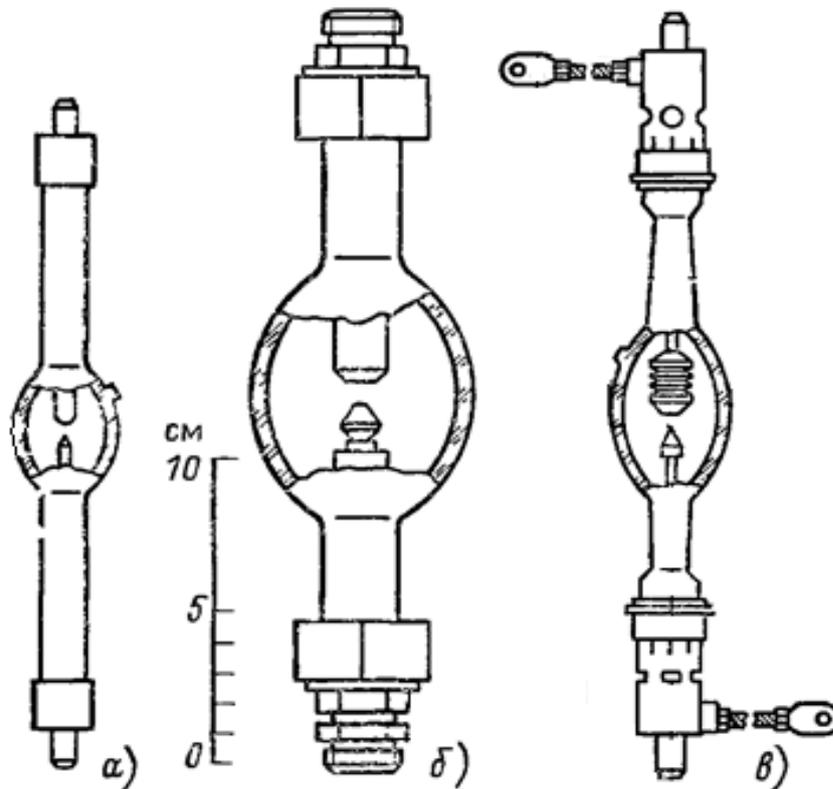


Рис. 2.22. Общий вид ксеноновых ламп с короткой дугой:
а – типа ДКсШ от 0,5 до 6,5 кВт; *б* – типа ДКсШРБ от 3 до 10 кВт;
в – типа ДКсШЭл от 1 до 6,5 кВт

Ксеноновые короткодуговые лампы могут выпускаться в керамической оболочке со встроенным рефлектором. Благодаря этому лампа получается более безопасной, так как из стекла сделано только небольшое окно, через которое выходит свет, а также не требуется юстировка при установке и замене. В такой лампе может быть окно, как пропускающее ультрафиолетовое излучение, так и непрозрачное для него. Рефлекторы могут быть параболическими и эллиптическими.

В ксеноновой лампе основной поток света излучается плазмой возле катода. Светящаяся область имеет форму конуса, причем яркость ее свечения падает по мере удаления от катода по экспоненте. Спектр ксеноновой лампы приблизительно равномерный по всей области видимого света, близкий к дневному свету. В лампах высокого давления могут быть несколько пиков вблизи инфракрасного диапазона, примерно 850–900 нм, которые могут составлять до 10 % всего излучения по мощности.

Ксеноновая лампа с короткой дугой имеет отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Для поджига дуги требуется зажигающий импульс 15–30 кВ, а иногда и до 50 кВ. В рабочем режиме требуется точная регулировка напряжения и тока, чтобы не превысить номинальную электрическую мощность лампы, так как по мере прогрева лампы ее сопротивление значительно уменьшается, и кроме того, возможно появление колебаний плазмы. При питании выпрямленным током необходимо, чтобы уровень пульсаций не превышал 10–12 %, так как колебания напряжения ускоряют износ электродов. Существуют разновидности ксеноновых ламп для переменного тока.

Лампы с длинной дугой, например отечественная ДКсТ, не столь требовательны к качеству питания и могут использоваться без балласта, требуя лишь пускатель (рис. 2.23).

Ксеноновая лампа с короткой дугой была изобретена в 1940-х гг. в Германии. Лампа нашла широкое применение в кинопроекторах. Лампа дает яркий белый свет, близкий к дневному спектру. На сегодняшний день практически во всех пленочных и цифровых кинопроекторах используются ксеноновые лампы мощностью от 450 Вт до 18 кВт [8, 9].

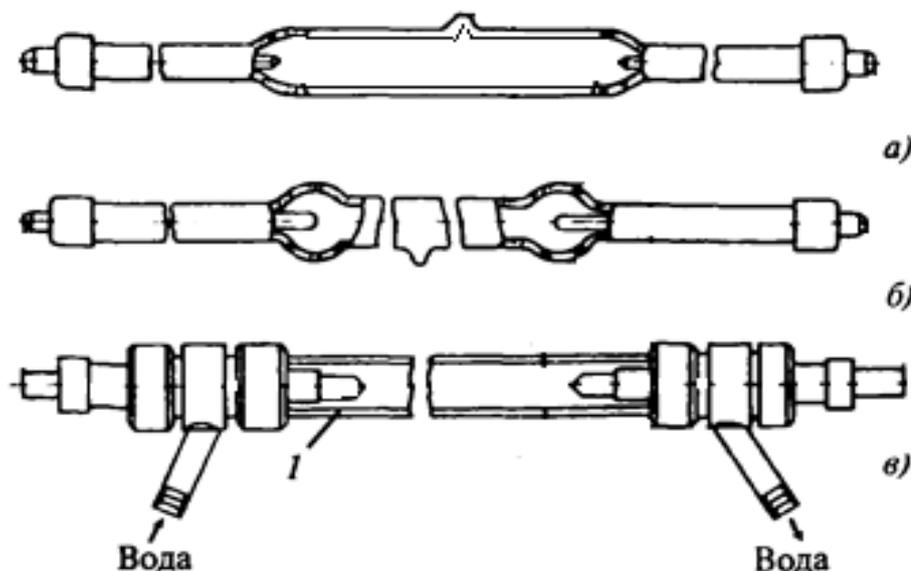


Рис. 2.23. Общий вид ксеноновых трубчатых ламп:
а – типа ДКсТ5000; *б* – типа ДКсТ10000 и ДКсТ20000; *в* – типа ДКсТВ6000
 и ДКсТВ15000 с водяным охлаждением

Существуют также ртутно-ксеноновые лампы, в которых кроме ксенона в колбе находятся пары ртути. В них светящиеся области есть как возле катода, так и возле анода. Они излучают голубовато-белый свет с сильным выходом ультрафиолета, что позволяет использовать их для физиотерапевтических целей, стерилизации и озонирования.

Благодаря малым размерам светящейся области ксеноновые лампы могут использоваться как точечный источник света, позволяющий производить достаточно точную фокусировку, а хорошая цветопередача обуславливает широкое применение в прожекторах и в сценическом освещении в кино- и фотосъемке. Ксеноновые лампы также используются в климатических камерах – установках, моделирующих солнечное излучение для испытания материалов на светостойкость. Благодаря малому размеру излучающей области они нашли применение в оптических приборах.

Начиная с 1991 г., ртутно-ксеноновые лампы нашли широкое распространение в автомобильных фарах (рис. 2.24), где в лампах основной световой поток формируют ртуть, соли натрия и скандия, а в атмосфере ксенона разряд происходит только на время запуска, до испарения других компонентов. Поэтому их стоит скорее относить к металлогалогенным лампам.

Классическая схема по розжигу лампы блоком розжига происходит при помощи разрядника. Напряжение начинает подаваться с низковольтной части на высоковольтную. Сначала подается напряжение и после происходит постепенное накопление напряжения. От одного цикла к иному периодически происходит постепенное накопление напряжения. В промежутке от одного цикла к иному в устройстве начинает возникать напряжение, которое и пробивает разрядник. Определенное количество этих циклов просто необходимо и у каждой разработанной модели блока они отличаются.

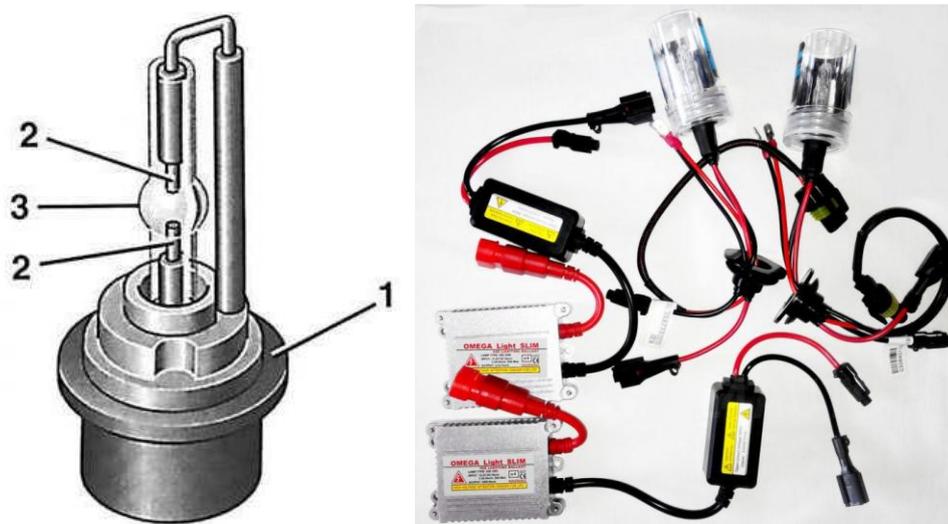


Рис. 2.24. Общий вид ксеноновой лампы для автомобильных фар с блоками розжига:
1 – основание, 2 – электроды, 3 – стеклянная колба с ксеноном и ртутью

Когда происходит разряжение, оно направляется в лампу, что и приводит к ее свечению. Напряжение блока питания может быть от 20 до 30 кВ. После того, как лампа поддалась розжигу, балласт переходит в режим поддержания постоянного, тлеющего разряда. Для того чтобы лампа не затухала и не мигала, давала нужный световой поток, блок розжига поддерживает на протяжении всего рабочего процесса необходимый уровень напряжения, около 80 Вольт [8, 9].

В зависимости от смеси газов, цветовая температура бывает 3000, 4300, 5000, 6000, 8000, 10000, 12000 К. Ксенон с цветовой температурой 3000 К идеально подходит для противотуманных фар, так как имеет насыщенно-желтый свет, который отлично освещает дорогу во время тумана. Оптимальная для восприятия человеческим глазом цветовая температура свечения лампы составляет 4300 К. Для безопасного вождения и хорошей освещенности дороги рекомендуется выбирать цветовую температуру 4300 К или 5000 К, но не более 6000 К. Ксенон цветовой температуры свыше 6000 К имеет более фиолетовое свечение и значительно хуже освещает мокрую дорогу.

Спектр излучения ксеноновой лампы идентичен спектру излучения Солнца, поэтому ее используют в установках, имитирующих солнечное воздействие на различные технические устройства.

2.12. Особенности конструкции и принципа действия серных ламп

Серная лампа – источник света (рис. 2.25) квазисолнечного спектра, с широким по сравнению с другими плазменными источниками света спектром излучения, наиболее близким к солнечному излучению (рис. 2.26), который генерируется серой, находящейся в состоянии плазмы [13].



Рис. 2.25. Внешний вид серной лампы

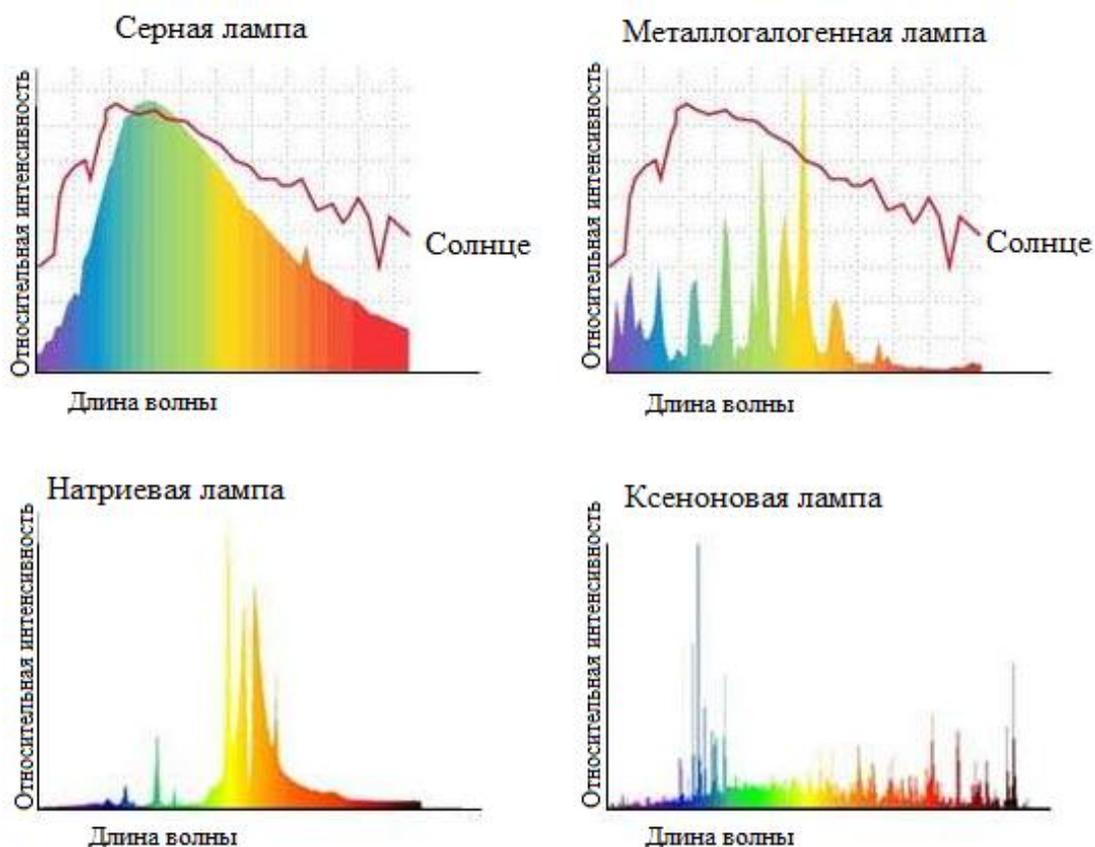


Рис. 2.26. Примеры спектров излучения различных ламп

У других плазменных источников света в спектре излучения преобладают отдельные длины волн, придающие световому потоку желтый, красный или синий оттенок (рис. 2.26).

Источником светового излучения является кварцевая сферическая колба, наполненная порошком серы и инертным буферным газом (рис. 2.27). Излучающий разряд в смеси серных паров и буферного газа (как правило, аргона) возбуждается микроволновым излучением от магнетрона, охлаждаемого специальным вентилятором.

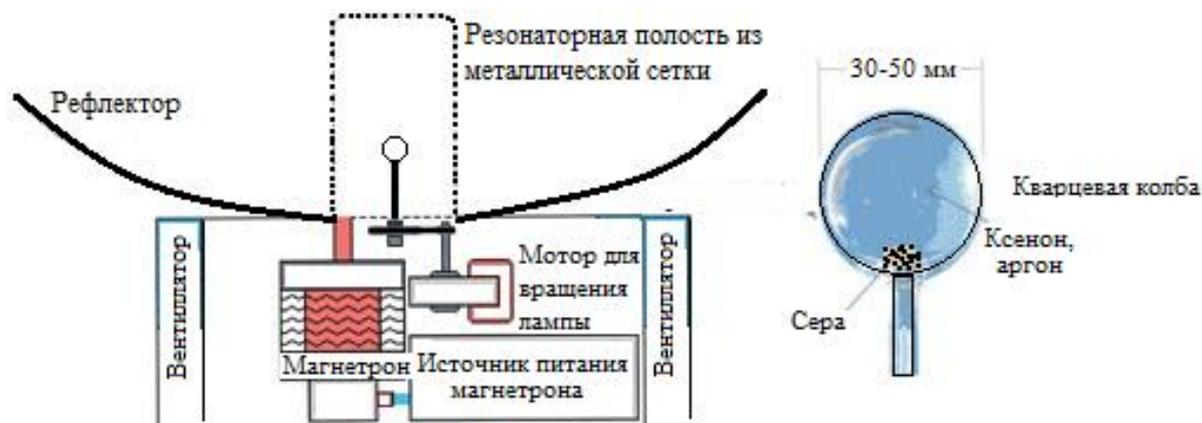


Рис. 2.27. Устройство серной лампы

Колба диаметром 30–50 мм заключена в резонаторной полости, выполненной из проволочной сетки. От магнетрона через волновод микроволновое излучение частотой 2,45 ГГц подается в резонаторную полость. Это излучение возбуждает разряд в колбе, в результате чего буферный газ и колба нагреваются, в свою очередь нагревая и испаряя серу. Затем образуется ярко светящийся объем плазмы, излучение которой уже определяется практически только парами серы.

Плазма серы излучает мощный свет со спектром, близким к спектру солнечного света, почти без инфракрасной и ультрафиолетовой составляющих. Спектр излучения серной лампы представляет собой сочетание атомарного и молекулярного спектров серы. Пропорция их зависит от интенсивности СВЧ поля накачки. Также в спектре присутствуют в небольшом количестве линии атомарного инертного газа.

Поскольку нагрев весьма значителен, температура стенки колбы может достигать 1000°C, требуется принудительное охлаждение. Это достигается воздушным потоком и одновременным вращением колбы с помощью электромотора. Колба обычно помещается в фокусе параболического отражателя. Резонатор должен выполнять три функции: 1) формировать определенную моду электромагнитных колебаний; 2) быть непрозрачным для микроволнового излучения; 3) обеспечивать минимум потерь оптического излучения.

Менять цветовую температуру в некоторых пределах можно, меняя давление паров серы в колбе. Так, повышение давления с 4,4 до 12,1 бар повышает длину волны максимума излучения с 470 до 570 нм, что соответствует снижению цветовой температуры с 6100 до 5100 К. Однако, доля видимого излучения при этом снижается более чем полтора раза с 68 % до примерно 40 %.

Срок службы серной безэлектродной лампы определяется ресурсом блока питания, преобразующего переменный ток в постоянный, и электромотора охлаждающей системы. Срок службы первых серных ламп составлял примерно 10–15 тыс. ч. Ресурс колбы гораздо выше, так как сера практически не реагирует с раскаленным кварцем. Срок службы колбы вполне может достигать 60 тыс. ч. Фирма LG заявляет срок службы своих плазменных прожекторов в 100 тыс. ч. Рабочий диапазон температур ламп составляет от –20 до 60 °С.

В России на базе Научно-исследовательского кинофотоинститута (НИКФИ) была создана СВЧ-лампа (рис. 2.28, рис. 2.29, табл. 2.1) [14].

Основные технические характеристики S-лампы НИКФИ

Напряжение питания / потребляемый ток	220В / <5.5А
Световой поток	120 клм
Сила света (1,7 м)	9500 кд
Световая отдача	99 лм/Вт
Срок службы	более 50 000 ч
Масса	9 кг



Рис. 2.28. S-лампа НИКФИ в моноблочном исполнении со встроенным источником питания

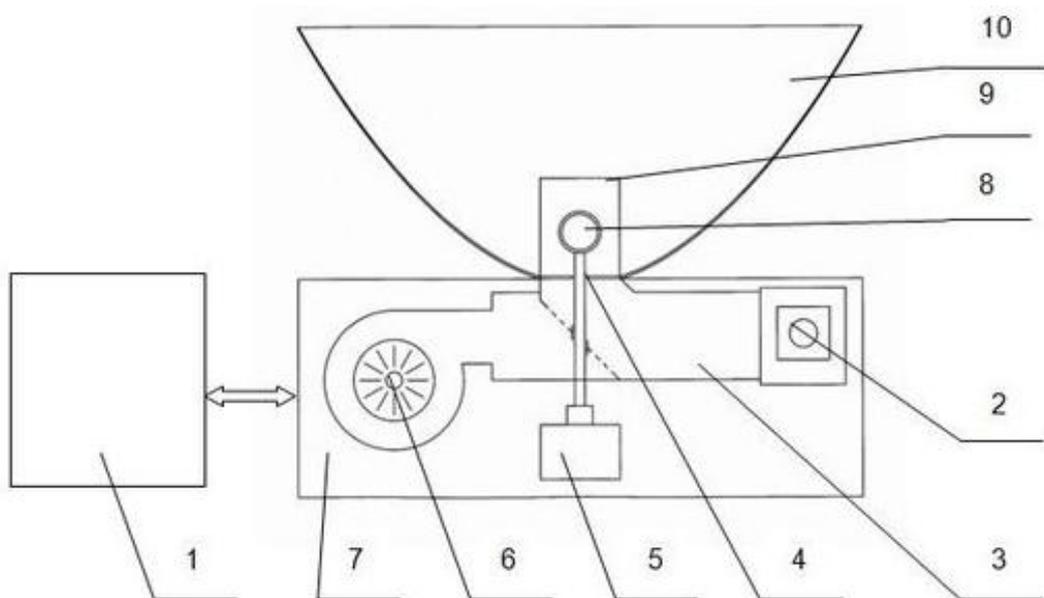


Рис. 2.29. Схема устройства СВЧ-лампы НИКФИ:
 1 – блок питания, управления и контроля, 2 – магнетрон, 3 – волновод,
 4 – СВЧ-возбудитель, 5 – электродвигатель горелки, 6 – вентилятор,
 7 – корпус лампового модуля, 8 – горелка, 9 – сетка, 10 – отражатель

Спектр оптического излучения СВЧ S-лампы НИКФИ отличается значительно пониженным уровнем излучений в УФ и ИК диапазонах (рис. 2.30).

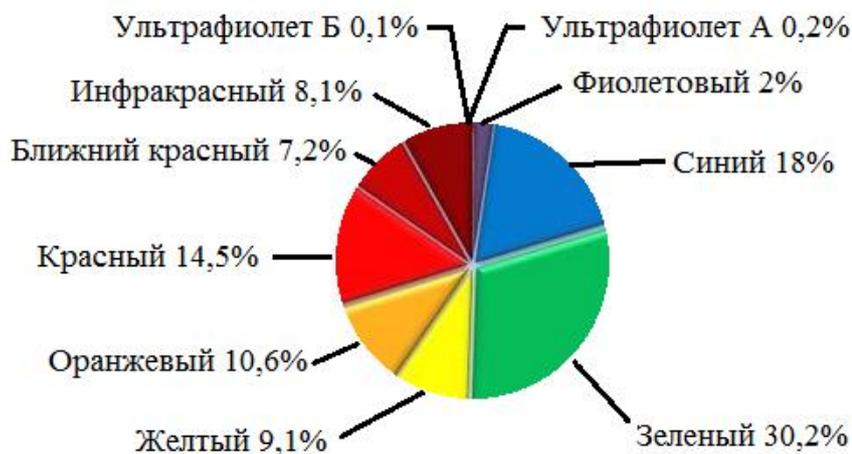


Рис. 2.30. Спектр оптического излучения СВЧ S-лампы НИКФИ

Технические особенности такого источника света сужают выбор моделей построения оптической системы. Существует как минимум два варианта формирования светового потока. Один вариант на базе полых световодов диаметром 250–400 мм. Второй – рефлектор, который формирует световой поток как у прожектора заливающего света.

Серная лампа, в силу особенностей своего спектра, оказалась прекрасным источником света для фотосинтеза растений и, соответственно, для использования в оранжерейном освещении. Компания Fusion Lighting по заказу NASA провела исследование, с целью увеличить излучение лампы на длинах волн в районе 625 нм, где квантовая эффективность фотосинтеза близка к единице. Оказалось, что добавление в колбу бромида кальция создает пик излучения вблизи 625 нм. При этом наблюдается лишь небольшое снижение интенсивности излучения в области малых длин волн, доля же инфракрасного излучения остается практически неизменной.

На практике наиболее конкурентоспособны и востребованы СВЧ-лампы мощностью 800–1000 Вт и световым потоком примерно до 130 клм. Они относительно просты конструктивно, не требуют принудительного обдува горелки, позволяют использовать обычные серийные магнетроны, применяемые в бытовых СВЧ-печах.

Суммируя известные сегодня данные, можно выделить основные достоинства СВЧ-световых приборов с безэлектродными лампами, к которым относятся:

1. Повышенная до 100 лм/Вт световая отдача (световая отдача непосредственно колбы составляет 150 лм/Вт, но около трети мощности теряется в трансформаторе, магнетроне, на работу вентиляторов и т.д.).

2. Сплошной квазисолнечный спектр оптического излучения с резко пониженным уровнем излучений в УФ и ИК диапазонах и с максимумом спектра, совпадающим с максимумом кривой чувствительности человеческого глаза. Это естественная цветопередача.

3. Отсутствие мерцания источника света.

4. Малогабаритность и равномерная яркость светящего тела, облегчающая оптимизацию оптических систем.

5. Высокая (десятки тысяч часов) долговечность лампы.

6. Экологическая чистота материалов наполнения лампы: серы и аргона.

7. Возможность регулировки силы света.

8. Возможность модульного ремонта в блочных конструкциях крупных ламп.

К недостаткам серных ламп относятся:

1. Сложность конструкции.

2. Высокая стоимость лампового модуля.

3. Высокая температура колбы горелки, отсюда необходимость использования высококачественного кварцевого стекла и защиты от пыли.

4. Большой диаметр светящегося тела (25–30 мм), усложняющий фокусировку и использование в оптических системах.

5. Инертность (лампа достигает 80 % номинальной светимости через 20–25 с, а после выключения может быть включена только через 5–15 мин).

6. Высокий уровень акустического шума из-за необходимости интенсивного обдува колбы.

7. Трудности в подавлении просачивающегося в окружающую среду микроволнового излучения.

2.13. Особенности конструкции и принципа действия плазменных ламп

Плазменная лампа – декоративный прибор, состоящий обычно из стеклянной сферы с установленным внутри электродом (рис. 2.31). На электрод от трансформатора подается переменное высокое напряжение с частотой около 30 кГц (рис. 2.32).

Блок питания – конденсаторный, преобразователь – однотранзисторный блокинг-генератор, создает на выходе трансформатора высоковольтное высокочастотное напряжение. Конденсатор $C1$ ограничивает ток, работает как резистор, в результате напряжение на $C2$ получается 33 В. Резистор $R1$ нужен

для разряда $C1$ после выключения схемы. При питании напряжением 220 В на конденсаторе $C1$ напряжение достигает значения в 33 В.



Рис. 2.31. Лампа «Плазменный шар»

Внутри сферы находится разреженный газ для уменьшения напряжения пробоя. В качестве наполнения могут выбираться разные смеси газов для придания «молниям» определенного цвета. Теоретически срок службы у плазменных ламп может быть весьма продолжительным, поскольку это маломощное осветительное устройство, не содержащее нитей накаливания и не нагревающееся в процессе своей работы. Типичная потребляемая мощность 2–10 Вт. Плазменная лампа была изобретена Николой Тесла в 1894 г..

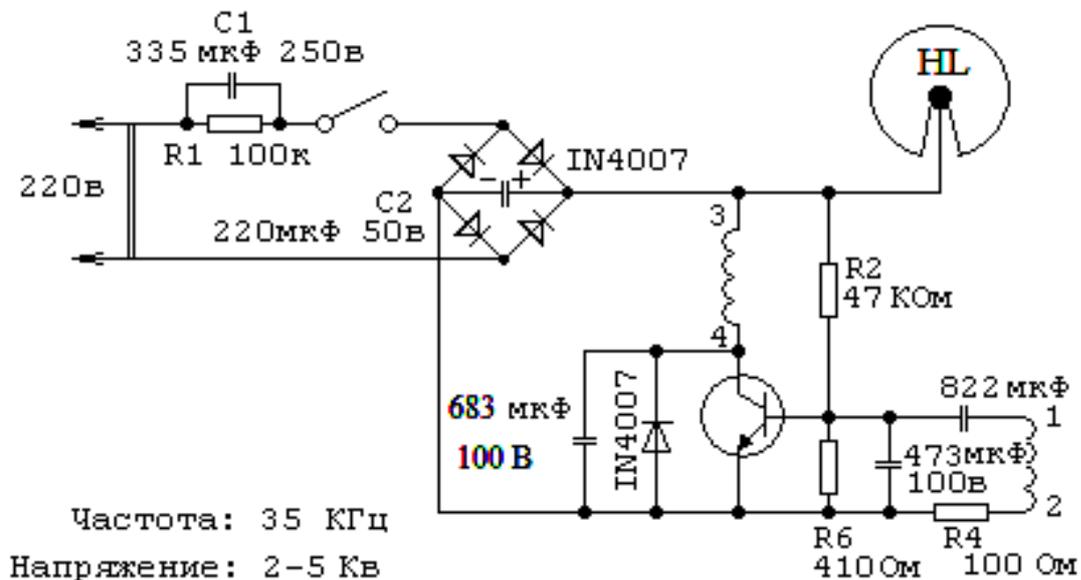


Рис. 2.32. Электрическая схема лампы «Плазменный шар»

При обращении нужно соблюдать меры предосторожности. Если на плазменную лампу положить металлический предмет вроде монеты, можно получить ожог или удар током. Кроме того, прикосновение металлическим предметом к стеклу способно привести к возникновению электрической дуги и прожиганию стекла насквозь.

Значительное переменное электрическое напряжение может индуцироваться лампой в проводниках даже сквозь непроводящую сферу. Прикосновение одновременно к лампе и к заземленному предмету, например к батарее отопления, приводит к удару электрическим током.

Аналогично, надо стараться не помещать электронные приборы рядом с плазменной лампой. Это может привести не только к нагреванию стеклянной поверхности, но и к существенному воздействию переменного тока на сам электронный прибор. Электромагнитное излучение, создаваемое плазменной лампой, может наводить помехи в работе таких приборов, как цифровые аудиопроигрыватели и подобные устройства. Если к работающей плазменной лампе на расстоянии 5–20 см поднести неоновую, люминесцентную (в том числе и неисправную, но не разбитую) или любую другую газоразрядную лампу, то она начнет светиться.

2.14. Особенности конструкции и принципа действия гелий-неонового лазера

Гелий-неоновый лазер – это оптический квантовый генератор, активной средой которого является смесь гелия и неона (рис. 2.33). Имеет рабочую длину волны 632,8 нм, расположенную в красной части видимого спектра [15].



Рис. 2.33. Устройство гелий-неонового лазера

Рабочим телом гелий-неонового лазера служит смесь гелия и неона в пропорции 5:1, находящаяся в стеклянной колбе под низким давлением (обычно около 300 Па). Энергия накачки подается от двух электрических

разрядников, расположенных в торцах колбы, с напряжением около 1000–5000 В (в зависимости от длины трубки). Резонатор такого лазера обычно состоит из двух зеркал – полностью непрозрачного с одной стороны колбы, и второго, пропускающего через себя около 1 % падающего излучения на выходной стороне устройства.

Гелий-неоновые лазеры компактны. Типичный размер резонатора – от 15 см до 2 м. Их выходная мощность варьируется от 1 до 100 мВт. [15]

Ширина спектра излучения гелий-неонового лазера довольно мала и составляет 1,5 ГГц, что делает его хорошим источником излучения для использования в интерферометрии, голографии, спектроскопии, а также в устройствах считывания штрих-кодов.

Контрольные вопросы

1. Что такое люминесценция?
2. Каково устройство люминесцентных газоразрядных ламп низкого давления?
3. Опишите принцип действия люминесцентных газоразрядных ламп низкого давления.
4. Каковы области применения люминесцентных газоразрядных ламп низкого давления?
5. Каково устройство компактных люминесцентных ламп?
6. Опишите принцип действия компактных люминесцентных газоразрядных ламп.
7. Каковы области применения компактных люминесцентных газоразрядных ламп?
8. Опишите особенности конструкции и принципа действия кварцевых ламп.
9. Каково устройство индукционных ламп?
10. Опишите принцип действия индукционных ламп.
11. Каковы области применения индукционных ламп?
12. Каково устройство газоразрядных ламп типа ДРЛ?
13. Опишите принцип действия газоразрядных ламп типа ДРЛ.
14. Каковы области применения газоразрядных ламп типа ДРЛ?
15. Каково устройство металлогалогенных газоразрядных ламп?
16. Опишите принцип действия металлогалогенных газоразрядных ламп.
17. Каковы области применения металлогалогенных газоразрядных ламп?
18. Каково устройство натриевых газоразрядных ламп?

19. Опишите принцип действия натриевых газоразрядных ламп.
20. Каковы области применения натриевых газоразрядных ламп?
21. Каково устройство ксеноновых ламп?
22. Опишите принцип действия ксеноновых ламп.
23. Каковы области применения ксеноновых ламп?
24. Каково устройство серных ламп?
25. Опишите принцип действия серных ламп.
26. Каковы области применения серных ламп?
27. Каково устройство плазменных ламп?
28. Опишите принцип действия плазменных ламп.
29. Каковы области применения плазменных ламп?
30. Каково устройство гелий-неонового лазера?
31. Каковы области применения гелий-неонового лазера?

3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

3.1. Принцип действия полупроводниковых светоизлучающих диодов

Светоизлучающий диод – это полупроводниковый источник света, который способен преобразовать электрическую энергию в энергию оптического излучения на основе явления инжекционной электролюминесценции, происходящей в полупроводниковом кристалле с электронно-дырочным переходом или гетеропереходом либо контактом «металл – полупроводник» (рис. 3.1).

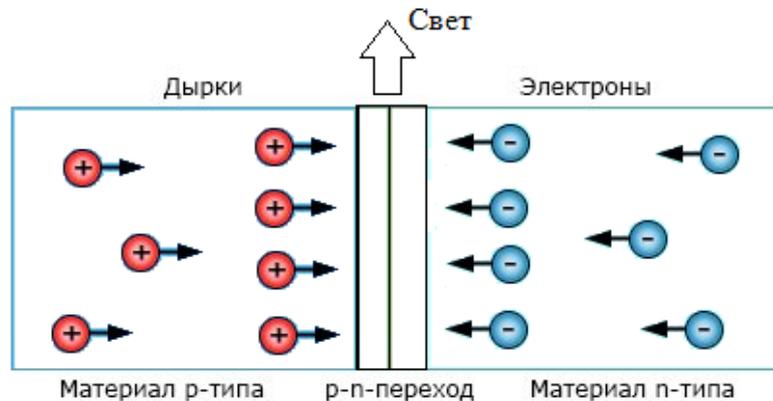


Рис. 3.1. Схема работы светоизлучающего диода

В основе работы полупроводниковых светоизлучающих диодов лежит ряд физических явлений, важнейшие из них: инжекция неосновных носителей в активную область структуры электронно-дырочным гомо- или гетеропереходом; излучательная рекомбинация инжектированных носителей в активной области структуры.

Явление инжекции неосновных носителей служит основным механизмом введения неравновесных носителей в активную область структуры светоизлучающих диодов. В обобщенном виде инжекция носителей *p-n*-переходом может быть представлена следующим образом.

Когда в полупроводнике создается *p-n*-переход, то носители в его окрестностях распределяются таким образом, чтобы выровнять уровень Ферми. В области контакта слоев *n*- и *p*-типов электроны с доноров переходят на ближайшие акцепторы и образуется дипольный слой, состоящий из ионизованных положительных доноров на *n*-стороне и ионизованных отрицательных акцепторов на *p*-стороне. Электрическое поле дипольного слоя создает потенциальный барьер, препятствующий дальнейшей диффузии электрических зарядов.

При подаче на p - n -переход электрического смещения в прямом направлении потенциальный барьер понижается, вследствие чего в p -область войдет добавочное количество электронов, а в n -область – дырок. Такое диффузионное введение неосновных носителей называется инжекцией.

Особенность решения вопросов инжекции при конструировании светоизлучающих диодов, в которых, как правило, одна из областей p - n -структуры оптически активна, то есть обладает высоким внутренним квантовым выходом излучения, заключается в том, что для получения эффективной электролюминесценции вся инжекция неосновных носителей должна направляться в эту активную область, а инжекция в противоположную сторону – подавляться. До недавнего времени это было проблемой.

Есть светоизлучающие диоды, в которых люминесцируют обе области p - n -перехода, а также область пространственного заряда, и от эффективности излучательной рекомбинации в этих областях зависят важные характеристики: цвет свечения, сила света и т.п. В этом случае инжекция носителей в обе области должна носить дозированный характер, что предъявляет высокие требования к точности легирования областей p - n -структуры.

Кардинальное решение проблемы односторонней инжекции дают гетеропереходы. В зонной модели резкого n - p - и p - n -гетероперехода в отличие от зонной модели гомоперехода вследствие разности электронного сродства контактирующих веществ появляются разрывы в валентной зоне и зоне проводимости. Наличие этих потенциальных барьеров при смещении перехода в пропускном направлении приводит к односторонней инжекции носителей тока из широкозонного материала в узкозонный практически независимо от уровня легирования n - и p -областей. Для обеспечения односторонней инжекции носителей с помощью гетероперехода достаточна разница в ширине запрещенной зоны около 0,1 эВ.

Другая особенность гетеропереходов заключается в возможности получения в узкозонном полупроводнике концентрации инжектированных носителей, превышающей концентрацию основных носителей в широкозонном полупроводнике. Этот эффект называется суперинжекцией. Явление суперинжекции позволяет получить в активной области высокую концентрацию инжектированных носителей, недостижимую с помощью гомоперехода.

Помимо инжекции существует еще один механизм возбуждения электролюминесценции – это ударная ионизация при обратном смещении *p-n*-перехода до напряжения электрического пробоя. Этот механизм менее эффективен, чем инжекционный, так как ударная ионизация требует высоких напряжений на *p-n*-переходе, вызывающих сильный перегрев *p-n*-перехода, который в отсутствие достаточного теплоотвода от кристалла может приводить к тепловому пробую и выходу прибора из строя.

Излучательная рекомбинация – единственный физический механизм генерации света в светоизлучающих диодах. В обобщенном виде эти механизмы можно классифицировать следующим образом [8, 25]:

1. Межзонная рекомбинация, при которой электрон из зоны проводимости переходит в валентную зону на место дырки непосредственно, излучая энергию, несколько большую ширины запрещенной зоны.

2. Рекомбинация свободных носителей на примесных центрах: электрон–акцептор или дырка–донор, при которой носитель захватывается на свой примесный центр, а затем рекомбинирует со свободным носителем противоположного знака.

3. Межпримесная или донорно-акцепторная рекомбинация, при которой носители захватываются на свои примесные центры, а затем электрон переходит с донора на акцептор в процессе акта излучательной рекомбинации; для такого перехода необходимо частичное перекрытие волновых функций электрона и дырки.

4. Рекомбинация связанных экситонов, при которой примесный центр захватывает электрон и дырку, так что возбуждение целиком локализуется вблизи центра, после чего осуществляется излучательная рекомбинация.

5. Экситонная рекомбинация, при которой электрон и дырка перед актом излучения связываются в свободный экситон, освободив часть энергии, равную энергии связи экситона.

Из светоизлучающего кристалла может быть выведена только часть генерируемого *p-n*-переходом излучения в связи со следующими основными видами потерь:

- 1) потери на внутреннее отражение излучения, падающего на границу раздела полупроводник–воздух под углом, большим критического;
- 2) поверхностные потери на френелевское отражение излучения, падающего на границу раздела под углом, меньшим критического;

3) потери, связанные с поглощением излучения в приконтактных областях;

4) потери на поглощение излучения в толще полупроводника.

Наиболее значительны потери на полное внутреннее отражение излучения.

Светодиод представляет собой гомо- или гетеро- *p-n*-переход, прохождение тока через который в прямом направлении сопровождается генерацией в полупроводнике излучения, роль люминофора выполняют *n-p* или *p-n*-переходы.

Рекомбинация характеризуется переходом электрона из зоны свободных уровней на уровни валентной зоны. Излучение кванта света, связанное с отдачей энергии электроном при переходе на более низкий уровень энергии, свойственно всем полупроводниковым материалам. Однако для многих из них, например для германия и кремния, измеряемая энергия мала и излучение находится в невидимой части спектра. Причиной является относительно малая ширина запрещенной зоны ΔW_3 этих полупроводников. Излучение видимого света при рекомбинации носителей заряда генерируют полупроводниковые материалы, имеющие большую, чем у германия и кремния, ширину запрещенной зоны. Наибольшее применение при изготовлении светодиодов получили фосфид галлия GaP ($\Delta W_3 = 2,2$ эВ), арсенид галлия GaAs ($\Delta W_3 = 1,5$ эВ) и карбид кремния SiC ($\Delta W_3 = 2,3 \div 3,1$ эВ). Основные современные материалы, используемые в светодиодах: InGaN, GaAlN, ZnSeS, ZnCdS, ZnS-GaP, ZnSe-GaP (синие, зеленые и ультрафиолетовые), GaAlAsP, GaInAsP (желтые, оранжевые, красные и инфракрасные).

Длина волны или цвет излучаемого света определяется разностью энергий уровней, между которыми происходит преимущественный переход электронов при рекомбинации. Эта разность может быть близка к ширине запрещенной зоны, как в арсениде галлия, или меньше ее, как в фосфиде галлия и карбиде кремния. В первом случае рекомбинация носителей заряда сопровождается непосредственным переходом электронов из зоны проводимости в валентную зону. Во втором случае рекомбинация происходит через рекомбинационные центры (ловушки), локальные уровни энергии которых располагаются внутри запрещенной зоны. Путем подбора типа дополнительно вносимой примеси можно задавать требуемые значения локальных уровней и тем самым получать необходимый цвет свечения, в частности красный, желтый, оранжевый и зеленый.

3.2. Технологии создания светодиодов белого свечения

В 1923 г. советский физик и изобретатель Олег Владимирович Лосев (1903–1942 гг., Тверь, Ленинград) обнаружил электролюминесценцию полупроводникового перехода [1]. Первые светодиоды, использующие этот принцип, так и называли – «Losev Light» (свет Лосева). Первым появился красный светодиод, затем в начале 70-х гг. появились желтые и зеленые светодиоды. Синий светодиод был создан в 1971 г. Яковом Панчечниковым, но он был чрезвычайно дорог [16]. В 1990 г. японец Сюдзи Накамура создал дешевый и яркий синий светодиод. Еще 20 лет назад считалось, что белый светодиод создать невозможно, однако после появления синего светодиода стало возможным делать белые источники света с тремя кристаллами (RGB). В 1996 г. появились первые белые люминофорные светодиоды. В них свет ультрафиолетового или синего светодиода преобразуется в белый с помощью люминофора. К 2005 г. световая эффективность таких светодиодов достигла значения 100 лм/Вт и более. Это позволило начать использовать люминофорные светодиоды для освещения, ведь светодиод является одним из самых экономичных источников света.

Выпускаются светодиоды разных цветов свечения: красного, желтого, зеленого, синего, сине-зеленого и белого, причем белый с недавних пор бывает нескольких оттенков, например холодного, теплого, «солнечного».

Цвет светодиода определяется типом полупроводникового материала, из которого он сделан и зависит исключительно от ширины запрещенной зоны, в которой рекомбинируют электроны и дырки, а также от легирующих примесей. Чем «синее» светодиод, тем выше энергия квантов, а значит, тем больше должна быть ширина запрещенной зоны.

Важнейшими элементами, используемыми в светодиодах, являются алюминий (Al), галлий (Ga), индий (In), фосфор (P), вызывающие свечение в диапазоне от красного до желтого цвета; галлий (Ga), индий (In), азот (N) – для получения голубого и зеленого свечений. Кроме того, если к кристаллу, вызывающему голубое свечение, добавить люминофор, то получим белый свет светодиода [17].

Основной задачей, стоящей перед учеными и инженерами, является получение экономичного светодиода с высоким коэффициентом цветопередачи. Экономичность источника света характеризуется световой отдачей. Лампы накаливания имеют световую отдачу около 18 лм/Вт. Светодиоды белого свечения в промышленности достигли сейчас значений

порядка 80 лм/Вт, то есть уровня экономичных люминесцентных ламп. В лабораториях получены значения световой отдачи до 150 лм/Вт. Когда эти значения будут достигнуты в массовом производстве, белые светодиоды вытеснят остальные лампы.

Изобретение синих светодиодов сделало возможным получение светодиодов белого свечения. Существует четыре способа создания белых светодиодов, каждый со своими достоинствами и недостатками.

Один из них – смешение излучения светодиодов трех или более цветов [16]. На рис. 3.2 показано получение белого света путем смешивания излучения красного, зеленого и синего светодиодов.

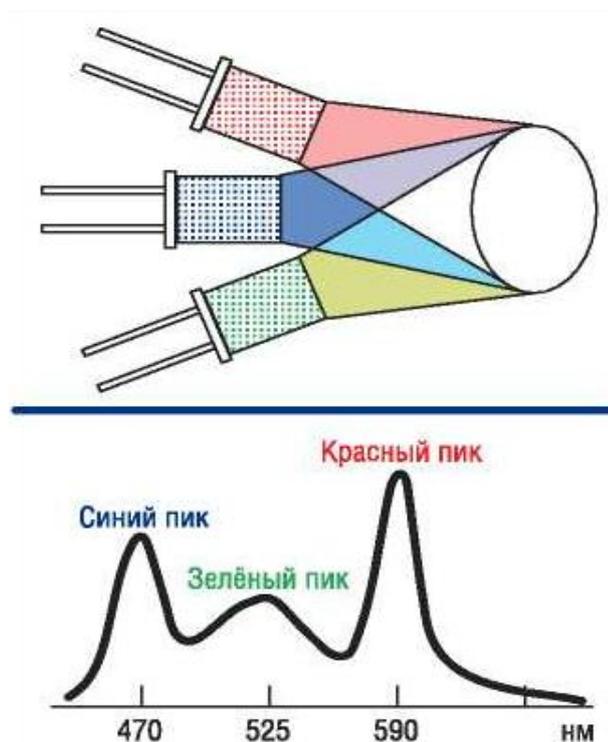


Рис. 3.2. Получение белого света путем смешивания излучения красного, зеленого и синего светодиодов

Такой способ должен быть наиболее эффективным. Для каждого из светодиодов: красного, зеленого или голубого – можно выбрать значения тока, соответствующие максимуму его внешнего квантового выхода излучения. Но при этих токах и напряжениях интенсивности каждого цвета не будут соответствовать значениям, необходимым для синтеза белого цвета. Этого можно достигнуть, изменяя число диодов каждого цвета и составляя источник из многих диодов. Для практических применений этот способ неудобен, поскольку нужно иметь несколько источников различного напряжения, много контактных вводов и устройства, смешивающие и фокусирующие свет от нескольких СД.

Второй и третий способы – смешение голубого излучения светодиодов с излучением либо желто-зеленого люминофора, либо зеленого и красного люминофоров, возбуждаемых этим голубым излучением [17]. На рис. 3.3 показано получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесенного на него слоя желтого люминофора.

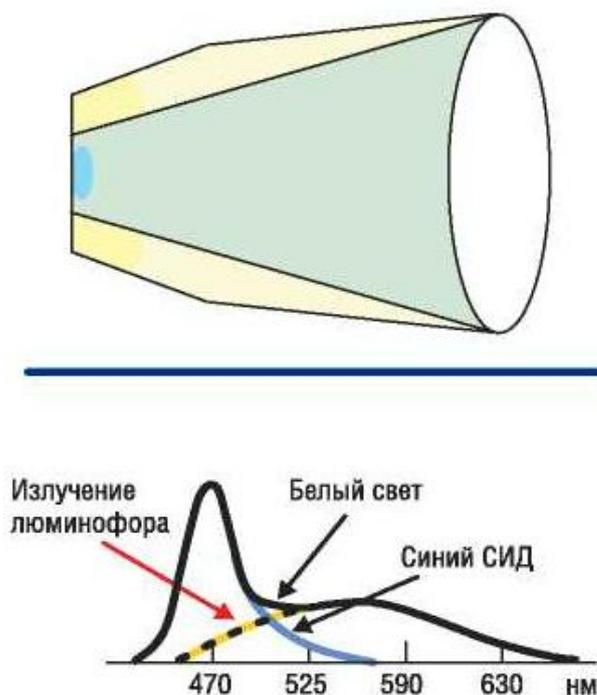


Рис. 3.3. Получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесенного на него слоя желтого люминофора

Эти способы наиболее просты и в настоящее время наиболее экономичны. Состав кристалла с гетероструктурами на основе InGaN/GaN подбирается так, чтобы его спектр излучения соответствовал спектрам возбуждения люминофоров. Кристалл покрывается слоем геля с порошком люминофора таким образом, чтобы часть голубого излучения возбуждала люминофор, а часть проходила без поглощения. Форма держателя, толщина слоя геля и форма пластикового купола рассчитываются и подбираются так, чтобы излучение имело белый цвет в нужном телесном угле. Продолжаются исследования различных люминофоров для белых СД.

Четвертый способ – смешение излучения трех люминофоров (красного, зеленого и голубого), возбуждаемых ультрафиолетовым светодиодом [17]. На рис. 3.4 показано получение белого света с помощью ультрафиолетового светодиода и *RGB*-люминофора.

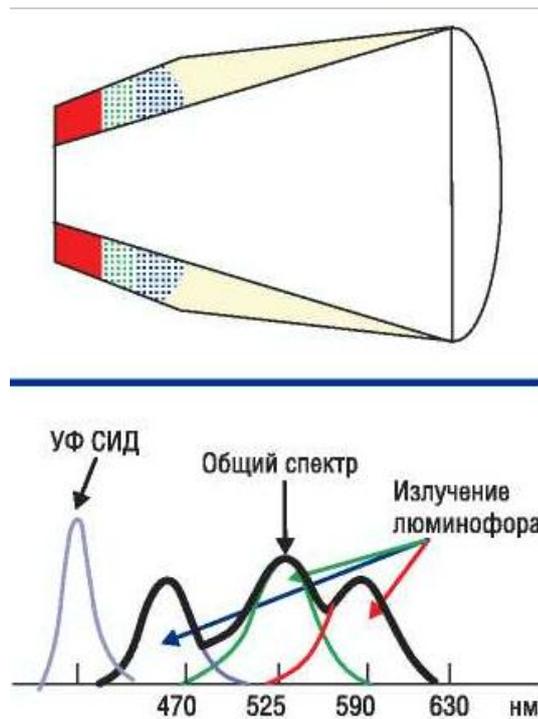


Рис. 3.4. Получение белого света с помощью ультрафиолетового светодиода и *RGB*-люминофора

Этот способ использует технологии и материалы, которые разрабатывались в течение многих лет для люминесцентных ламп. Он требует только два контактных ввода на один излучатель. Но этот способ связан с принципиальными потерями энергии при преобразовании света от диода в люминофорах. Кроме того, эффективность источника излучения уменьшается, так как разные люминофоры имеют разные спектры возбуждения люминесценции, не точно соответствующие УФ-спектру излучения кристалла СД.

Светоотдача белых светодиодов ниже, чем светоотдача светодиодов с узким спектром, поскольку в них происходит двойное преобразование энергии, часть ее теряется в люминофоре. В настоящее время светоотдача лучших белых СД 25...30 лм/Вт.

3.3. Разновидности светодиодов

Число типов светодиодов постоянно растет, они не стандартизированы и требуют применения дополнительной электроники.

Светодиоды можно классифицировать по размерам, конструкции, мощности и цветности.

По силе питающего тока принято следующее деление светодиодов на группы [16, 17]:

– **индикаторные** светодиоды с током питания менее 30 мА, силой света 500–1000 мкд, которые применяются для сигнализации в системах отображения информации (светодиоды стандартной яркости);

– **сверхъяркие** светодиоды с током питания 30–200 мА, силой света 1–3 кд, используемые для сигнализации в системах отображения информации и для освещения (светодиоды высокой яркости, с диаметром основания от 3 до 10 мм);

– **мощные** светодиоды с током питания 350, 500, 750 мА, световой поток которых составляет более 10 лм, предназначенные для освещения (светодиоды ультравысокой яркости).

Миниатюрные светодиоды являются главным образом простыми светодиодами, используемыми как индикаторы, размерами от 2 мм до 8 мм. Они обычно просты в проектировании и не требуют отдельного тела охлаждения – радиатора. Типичные действующие квалификационные отметки располагаются приблизительно от 1 мА к вышеупомянутым 20 мА.

Светодиоды повышенной мощности. Среди них выделяют:

– однокристалльные с прямым рабочим током 350 мА, мощностью 1 Вт;

– однокристалльные с прямым рабочим током 0,7–1 А (световая отдача составляет 25 лм/Вт);

– четырехкристалльные с прямым рабочим током 700 мА, мощность 5 Вт.

Светодиоды инфракрасного излучения – это полупроводниковые приборы, которые функционируют при длине волны $\lambda > 0,78$ мкм и отличаются от обычных светодиодов тем, что при протекании прямого тока работают обязательно в паре с фотоприемником. Поэтому важной характеристикой является направленность излучения и стабильность λ_{\max} . Они применяются в фотоэлектронной автоматике, внешних устройствах вычислительной техники, оптронных коммутационных устройствах, фотонных линиях связи.

Лазерные светоизлучающие диоды. Активным элементом являются кристаллы полупроводника, образующие резонатор и возбуждаемые либо инжекцией тока через *p-n*-переход, либо пучком электронов. Соответственно различают инжекционные лазеры и лазеры с электронным возбуждением.

Молекулярные полимерные светодиоды:

– **органический светодиод OLED** (от английского *Organic Light-Emitting Diode*) – полупроводниковый прибор, изготовленный из органических соединений, которые эффективно излучают свет

при пропускании через них электрического тока. Основное применение технология OLED находит при создании дисплеев, предполагается, что производство таких дисплеев будет дешевле аналогичных жидкокристаллических моделей. У стандартных светодиодов показатель энергетической эффективности составляет на сегодня 60–70 лм/Вт, у существующих органических светодиодов – всего 44 лм/Вт.

– **фосфоресцирующие светодиоды PLED** (от английского *Polymer Light-Emitting Diode*) – в производстве таких светодиодов использован раствор полимера.

Ведущими производителями светодиодов и устройств на их основе являются Nichia Chemical, Япония; Lumileds Lighting, США; Philips; Agilent Technologies, США; Osram Opt semiconductors; «Корвет-лайтс», Россия; «Протон», Россия; «Светлана Оптоэлектроника», Россия и другие.

3.4. Конструкция полупроводниковых светоизлучающих диодов

Свет в светодиодах генерируется вблизи *p-n*-перехода, откуда распространяется во всех направлениях прямолинейно. Конструкцию светодиода выполняют такой, чтобы получить наибольшую поверхность светоотдачи при наименьшей потере света за счет его поглощения в толще полупроводника. Этим обуславливаются и малые габариты светодиодов. Интенсивность излучения существенно повышается при выполнении светодиодов из прозрачного материала (фосфида галлия) [16, 17].

Излучающая активная область может быть по-разному размещена в кристалле. Для уменьшения потерь при выходе излучения из кристалла и улучшения диаграммы направленности иногда используют кристалл, отличный от параллелепипеда. Поскольку полупроводник оптически значительно более плотен, чем воздух, большая часть световых лучей не выходит наружу, а отражается от поверхности внутрь кристалла и, в конечном счете, поглощается. Так, для поверхности раздела арсенид галлия–воздух, лишь лучи, отклоняющиеся от нормали менее чем на 17° , выходят наружу. По сравнению с плоским кристаллом можно получить выигрыш в величине коэффициента вывода света $\eta_{\text{опт}}$ при использовании полупроводниковой полусферы (рис. 3.5 д, е) в 15–25 раз, пластмассовой линзы – в 3 или 4 раза (рис. 3.5 б, е), усеченного конуса – в 4–6 раз.

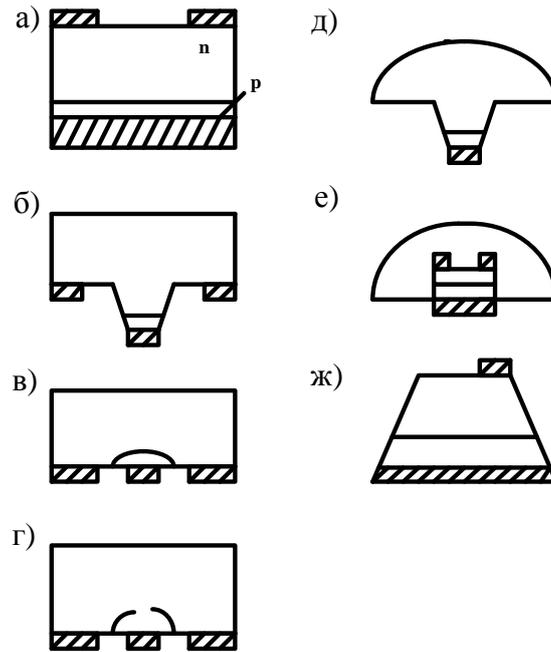


Рис. 3.5. Конструкции светодиодов: а), в), г) – плоский кристалл; б) усеченный конус; д), е) – полупроводниковая полусфера; ж) конус

Конус, изображенный на рис. 3.5 ж, улучшает диаграмму направленности торцевого излучения структур с широкой активной областью. Конструкции, приведенные на рис. 3.5 д, е, ж, сложны, дорогостоящи и непригодны для многих микроэлектронных устройств из-за увеличенных габаритов.

Выпускаемые светодиоды по конструкции могут быть разделены на следующие группы:

- 1) в металлостеклянном корпусе;
- 2) в конструкции с полимерной герметизацией на основе металлостеклянной ножки или рамочного держателя;
- 3) бескорпусные светодиоды.

Светодиоды по назначению можно условно разделить на две большие группы: индикаторные (мощностью до 0,2 Вт) (рис. 3.6) и осветительные.

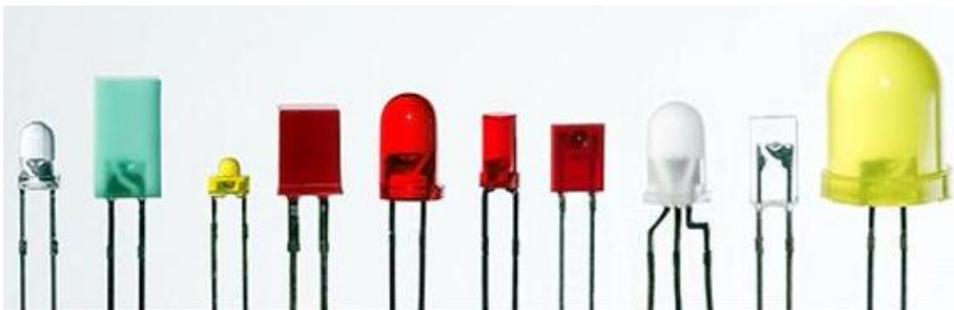


Рис. 3.6. Индикаторные светодиоды выводного монтажа с круглой или прямоугольной линзой

Основу многих светодиодов составляет искусственный полупроводниковый кристаллик размером $0,3 \times 0,3$ мм, в котором реализован *p-n*-переход. Цвет свечения зависит от материала кристаллика. Так, например, красные и желтые светодиоды, как правило, изготавливают на основе арсенида галлия, зеленые и синие – на галлий-нитридной основе. Усиления свечения добиваются двумя способами: 1) в состав кристаллика вводят специальные добавки и присадки; 2) применяют многослойные структуры, что позволяет реализовать в одном кристаллике сразу несколько *p-n*-переходов, увеличив тем самым яркость его свечения.

Кристаллик «сажают» в металлическую медную или алюминиевую полированную чашечку, которая является отражателем и «катодом» (-). К самому кристаллику «приваривают» золотую нить – «анод» (+). Затем всю конструкцию заливают прозрачным компаундом – полимерным материалом – эпоксидной смолой, которому придают определенную форму (рис. 3.7). От нее зависит угол излучения света, испускаемого кристалликом. Если верх колбы плоский, свет выходит широким пучком (угол излучения составляет $120\text{--}130^\circ$). Если верх выпуклый, получается линза, собирающая свет в более узкий пучок (угол излучения $8\text{--}60^\circ$).



Рис. 3.7. Конструкция светодиода мощностью 0,5 Вт и диаметром 5 мм

Эффективность полусферической конструкции самая высокая. Она в несколько раз превышает эффективность плоской конструкции, однако она дороже и сложнее в изготовлении. Чем меньше угол излучения, тем более интенсивный световой поток дает кристалл. Основное требование, которому должен отвечать светорассеивающий компаунд, – это максимальное рассеяние света при минимальном поглощении.

В основе явления рассеяния света лежит нарушение оптической однородности среды, которое обуславливает различие в скорости распространения света в ее разных частях. Это может быть вызвано какими-либо включениями, показатель преломления которых отличается от показателя преломления среды. Оптимальным светорассеивающим наполнителем следует считать оптически прозрачный аморфный материал с коэффициентом преломления, близким к коэффициенту преломления основного вещества. Этому условию хорошо отвечает, например, стекло кварцевое, оптическое, с показателем преломления $n = 1,46$, измельченное до частиц размером не более 15 мкм.

Кроме выводных LED, выпускаются светодиоды типа **SMD**. Сюда следует отнести сверхъяркие цветные и белые светодиоды мощностью около 0,1 Вт в корпусе для поверхностного монтажа (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Индикаторные SMD-светодиоды

Большинство осветительных светодиодов также выпускаются в корпусах SMD (рис. 3.9). В отличие от индикаторных светодиодов, они характеризуются большей мощностью.

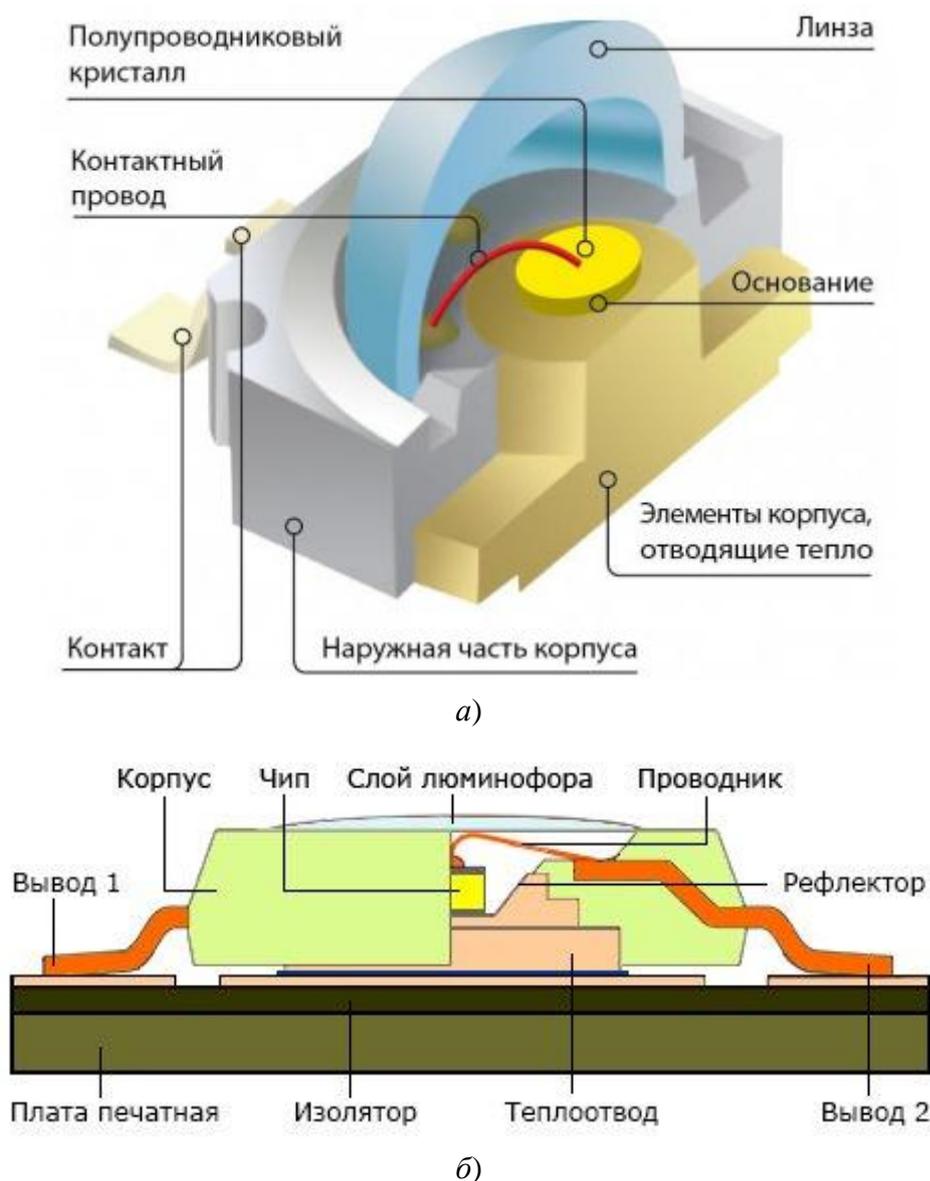


Рис. 3.9. Структура мощного (от 1 Вт) светодиода:
а) с линзой, б) без линзы

Для мощных светодиодов конструкция основана на следующих принципах:

- использованы высокоэффективные излучающие гетероструктуры в системах AlGaInP/GaAs , AlGaInP/GaP и InGaN , активная область гетероструктуры которых содержит либо одиночную, либо множественные квантовые ямы;

- излучающие кристаллы имеют площадь не менее 1 мм^2 , вместо $0,05 \text{ мм}^2$ в маломощных СИД диаметром 5 мм; увеличение площади кристалла направлено на увеличение светового потока и снижение теплового сопротивления кристалла;

– для увеличения светового потока в ряде конструкций применяется несколько кристаллов, соединенных как последовательно, так и параллельно-последовательно;

– в качестве кристаллодержателя для улучшения теплоотвода использованы мощные медные основания – радиаторы;

– для сбора и преобразования бокового излучения кристаллов применены соответствующие рефлекторы;

– для эффективного вывода излучения и формирования заданной диаграммы направленности излучения, конструкции светодиодов содержат полимерную линзу, согласованную по размерам с отражателем бокового излучения, а также в некоторых конструкциях вторичную оптику.

Большое распространение получили светодиоды типа **COB** (Chip On Board – чип на плате). По сути, это интеграция большого количества (несколько десятков) кристаллов SMD в одном корпусе, которые потом покрываются люминофором (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Светодиод типа COB

Как и в случае с монтажом нескольких SMD-светодиодов на плате, здесь получается похожий результат – большая яркость благодаря суммарному световому потоку от нескольких маленьких источников света. Но источники (кристаллы) расположены на подложке плотнее, поэтому и световой поток получается больше, чем при монтаже SMD на плате. Отремонтировать такую COB-матрицу невозможно, и если испортится часть кристаллов, то придется менять всю подложку целиком на новую.

Технология COB продолжает совершенствоваться, наращивая мощность за счет совершенствования технологий и увеличения плотности монтажа светодиодов. Компанией Cree линейка COB представлена сериями CXA и CXB (рис. 3.11).



Рис. 3.11. COB-матрицы компании Cree

Размер самой большой матрицы CXA достигает почти 35x35 мм, а ее световой поток составляет 12000 лм. Распространена практика применения нескольких матриц в одном изделии (рис. 3.12).



Рис. 3.12. Лампа с СД типа COB

Мощные светодиоды COB – твердотельные полупроводниковые источники света с прямым напряжением от 12 В до 39 В и силой прямого тока от 160 мА до 900 мА. Световой поток при этом в зависимости от номинала варьируется от 90 лм до 110 лм, а мощность рассеивания от 3 Вт до 30 Вт.

Светодиоды filament (светодиодная нить) конструктивно отличаются от других (рис. 3.13). На стеклянную подложку монтируется множество кристаллов, затем они заливаются флуоресцентным составом – люминофором (технология Chip On Glass – чип на стекле).

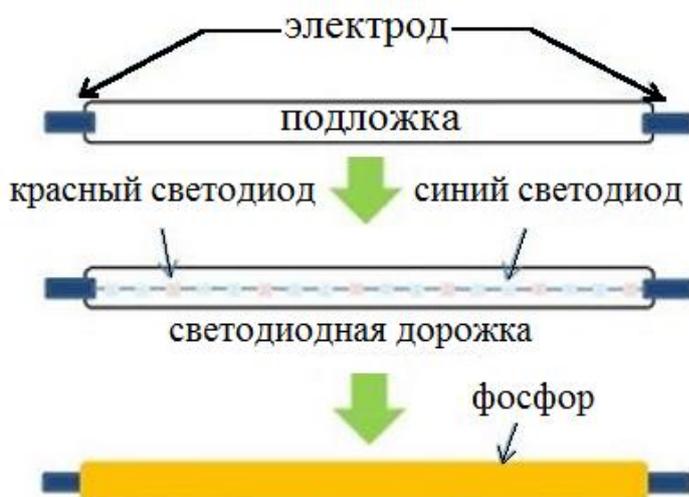


Рис. 3.13. Светодиодная нить

Сама подложка имеет цилиндрическую форму, что позволяет получить угол рассеяния светового потока 360° .

3.5. Конструкция светодиодных ламп

Устройство светодиодной лампы отличается от конструкции КЛЛ [17]. На рис. 3.14 показаны узлы, входящие в состав лампы. Линза-рассеиватель предназначен для равномерного распределения светового потока в пространстве и исключения ослепления при взгляде на светодиоды.

Светодиоды – источники оптического излучения. Основание светодиодов с печатными проводниками для их последовательного соединения выполняют в виде алюминиевой печатной платы для лучшего отвода тепла от светодиодов. Радиатор охлаждения необходим для отвода тепла, выделяющегося при работе светодиодов, часто из сплава алюминия. Драйвер формирует уровень электрического напряжения и тока, требующиеся для работы светодиодов. Корпус драйвера лампы предназначен для защиты драйвера от внешних воздействий. Цоколь изготавливают из латуни с никелевым покрытием с целью обеспечения надежного контакта с патроном и предотвращения возникновения коррозии.

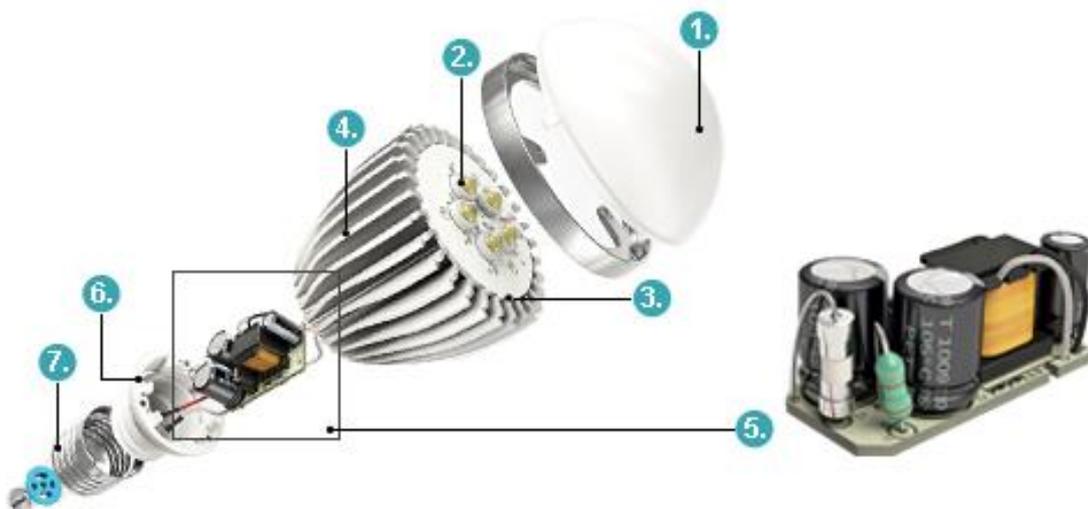


Рис. 3.14. Внешний вид светодиодной лампы в разобранном виде:
 1 – линза-рассеиватель, 2 – светодиоды, 3 – печатная плата, 4 – радиатор, 5 – драйвер,
 6 – внешний корпус драйвера, 7 – цоколь

Функциональное назначение драйвера:

- понизить напряжение до требуемой величины;
- преобразовать из переменного в постоянное;
- сгладить пульсации;
- защитить нагрузку от замыканий;
- защитить сеть от помех, образующихся при работе устройства.

Для бытовых осветительных приборов, рассчитанных на работу от сети 220 В, наиболее часто используются лампы с цоколями E14 и E27.

Светодиодные лампы на 220 В могут быть не только в форме привычных ламп накаливания, также популярны так называемые лампы «кукурузы» (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Внешний вид светодиодных ламп с цоколем E27

В настоящее время также набирают популярность Filament-лампы, по внешнему виду они напоминают лампы накаливания (рис. 3.16).



Рис. 3.16. Конструкция Filament-лампы

В Filament-лампах используются нитевидные светодиоды, которые помещаются в колбу с газом.

3.6. Полупроводниковые лазеры

Полупроводниковый лазер – твердотельный лазер, в котором в качестве рабочего вещества используется полупроводник [15]. В таком лазере, в отличие от лазеров других типов, используются излучательные переходы не между локализованными уровнями энергии атомов, молекул и ионов, а между разрешенными энергетическими зонами кристалла. В полупроводниковом лазере накачка осуществляется: 1) непосредственно электрическим током (прямая накачка); 2) электронным пучком; 3) электромагнитным излучением.

Под именем полупроводниковых часто встречается гибридный лазер, состоящий из мощного светодиода накачки и наклеенного на него твердотельного активного элемента. Плюс таких лазеров в том, что светодиодную структуру накачки можно сделать довольно протяженной и, соответственно, мощной. Механические деформации от нагрева меньше сказываются на активном элементе. Полупроводниковые лазеры с мощностями единицы-десятки ватт делают в основном именно по такой технологии. Визуально отличить гибридный лазер от полупроводникового довольно сложно.

Поскольку в полупроводниковом лазере атомы, составляющие кристаллическую решетку, возбуждаются и излучают коллективно, сам лазер может обладать очень малыми размерами.

Другими особенностями полупроводниковых лазеров являются высокий КПД, малая инерционность, простота конструкции.

Первыми были разработаны инжекционные полупроводниковые лазеры на основе арсенида галлия (рис. 3.17). Активным веществом, в котором происходит генерация излучения, является монокристалл арсенида галлия, имеющий форму параллелепипеда со сторонами длиной несколько сотен микрон. Две боковые грани делаются параллельными и полируются с высокой степенью точности. За счет большого показателя преломления ($n = 3,6$), на границе «кристалл-воздух» получается достаточно большой коэффициент отражения (около 35 %), что достаточно для получения генерации когерентного излучения без дополнительного напыления отражающих зеркал. Две другие грани кристалла скошены под некоторым углом; через них индуцированное излучение не выходит. Генерация когерентного излучения происходит в p - n -переходе, который создается путем диффузии акцепторных примесей (Zn, Cd и др.) в область кристалла, легированную донорными примесями (Te, Se и др.).

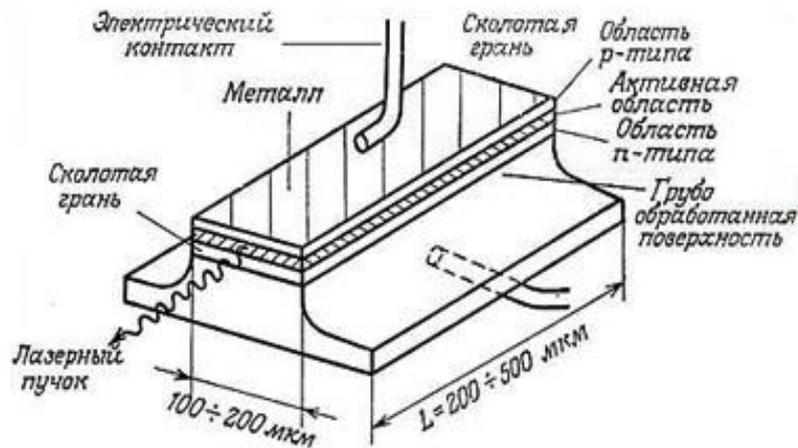


Рис. 3.17. Структура полупроводникового лазера на основе арсенида галлия

Толщина активной области в перпендикулярном к p - n -переходу направлении составляет около 1 мкм. К сожалению, в такой конструкции полупроводникового лазера пороговая плотность тока накачки оказывается достаточно большой (около 100 тыс. А на 1 см^2). Поэтому этот лазер мгновенно разрушается при работе в непрерывном режиме при комнатной температуре и требует сильного охлаждения. Лазер способен стабильно работать даже при температуре жидкого азота (77 К).

Современные полупроводниковые лазеры делают на базе двойных гетеропереходов (рис. 3.18). В такой структуре пороговую плотность тока удается уменьшить на два порядка, до 1000 А/см^2 .

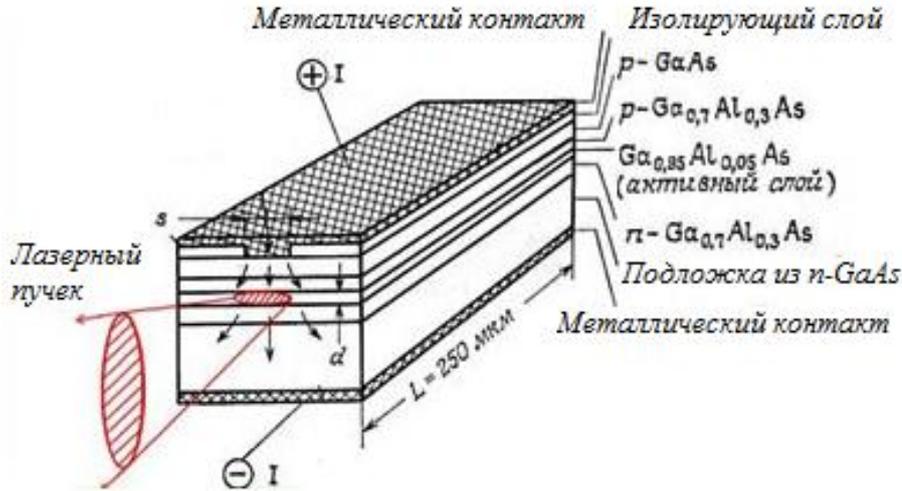


Рис. 3.18. Полупроводниковый лазер на базе двойных гетеропереходов

При такой плотности тока возможна стабильная работа полупроводникового лазера и при комнатной температуре. Первые образцы лазеров работали в инфракрасном диапазоне (850 нм). При дальнейшем совершенствовании технологии формирования полупроводниковых слоев появились лазеры как с увеличенной длиной волны (1,3–1,6 мкм) для оптоволоконных линий связи, так и с генерацией излучения в видимой области (650 нм). Уже существуют лазеры, излучающие в синей области спектра. Большим преимуществом полупроводниковых лазеров является их высокий КПД (соотношение энергии излучения к электрической энергии накачки), которое доходит до 70 %. Для газовых лазеров, как для атомарных, так и ионных, КПД не превышает 0,1 %.

Типичным представителем полупроводниковых лазеров является лазерный диод – лазер, в котором рабочей областью является полупроводниковый *p-n*-переход [15]. В таком лазере излучение происходит за счет рекомбинации электронов и дырок.

В полупроводниковых лазерах используются различные полупроводниковые материалы (ZnS, ZnSe, CdS, CdSe, CdTe, GaPAs, GaAs, GaSb, InAs, InSb, Te, PbS, PbTe, PbSe, InP, InAsP). С помощью этого класса приборов можно получать индуцированное излучение в широком диапазоне (от ультрафиолетового излучения до далекой инфракрасной области). Так, лазер на сульфиде кадмия (CdS) генерирует излучение с $\lambda = 490 \text{ нм}$. Главным достоинством полупроводниковых лазеров является высокий КПД (от десятков процентов до величины, близкой к 100 %).

Эти лазеры получают широкое распространение в вычислительной технике, телевидении, оптической локации, голографии и в специальных разделах оптики.

Лазерные диоды представляют собой особым образом обработанные полупроводниковые кристаллы, которые при подаче напряжения генерируют очень узкий пучок света. Широкое применение эти диоды нашли в лазерных указках (рис. 3.19), целеуказателях, DVD-приводах, оптических компьютерных мышках, линиях оптоволоконной связи.

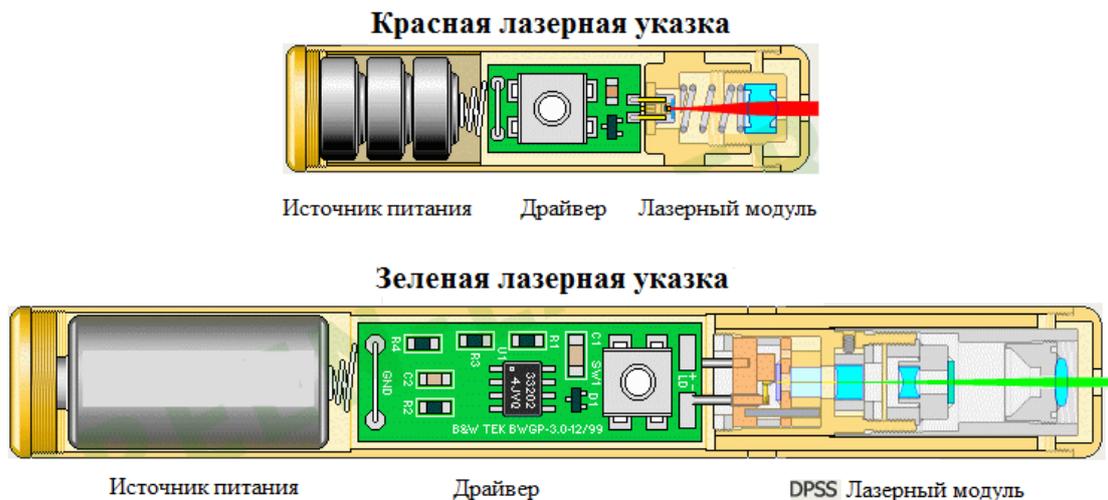


Рис. 3.19. Полупроводниковая лазерная указка

Большинство лазерных головок имеют два полупроводника: лазерный диод и фотодиод. Между ними есть обратная оптическая связь. Посредством фотодиода регулируется сила тока от питающего драйвера. У лазерного диода имеются 3 вывода: катод лазерного диода, анод фотодиода и общий провод (рис. 3.20).

Область применения лазерного диода определяется длиной волны излучения испускаемого светового луча.

Поток фотонов красного цвета ($\lambda = 650$ нм) наиболее часто используется в конструкциях дисководов.

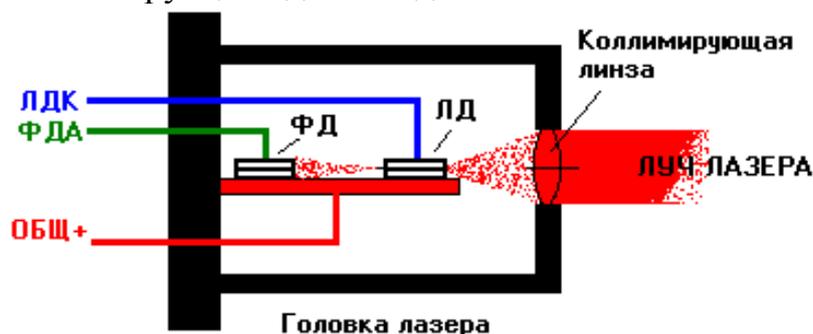


Рис. 3.20. Схема головки полупроводникового лазера

При дневном свете луч этого лазера виден не очень хорошо, но причина этому только невосприимчивость человеческого зрения. При мощности от 20–50 мВт и фокусировки светового пятна в минимально возможную по площади точку проявляется эффект «жжения». Мощность на 200 мВт при правильной фокусировке позволяет резать бумагу различной плотности.

Поток зеленого цвета ($\lambda = 532$ нм). Лазеры данного типа очень хрупки и чувствительны к температурным всплескам, требуют крайне осторожного обращения, обладают весьма сложным устройством со ступенчатым преобразованием излучения. Главный положительный момент их применения: зрительно излучение на 532 нм наиболее хорошо различимо. Поэтому использовать лазер зеленого цвета мощнее, чем на 5 мВт будет небезопасно для зрения. Кроме того, в силу особенностей конструкции вместе с зеленым спектром лазер поставляет и инфракрасный с длиной волны на 808 нм и 1064 нм, а это только повышает травмоопасность такого прибора. Правда, в более дорогих экземплярах стоят специальные фильтры, но это обязательно нужно проверять.

Фиолетовое излучение ($\lambda = 405$ нм). Опасно тем, что слабо различимо для человеческого глаза и кажется слабым по мощности, хотя на деле ситуация строго противоположная. Его трудно сфокусировать. В общем, в целях эксплуатации не самый удобный вариант. Может быть актуален разве что при работе с фоторезисторами.

Инфракрасное излучение ($\lambda = 780$ нм). Опасно в силу того, что не воспринимается человеческим зрением от слова совсем. А это грозит различными травмами зрения. Работа возможна только при отсутствии инфракрасного фильтра, что обеспечит хотя бы относительную видимость луча.

Излучение также инфракрасное с надбавкой CO₂ ($\lambda = 10$ мкм). Наиболее широко применяется в промышленности. Подобные лазеры имеют низкую стоимость, высокую мощность и отличаются высоким КПД. Используются данные лазерные диоды для резки металла или фанеры. С их помощью выполняется гравировка.

3.7. Преимущества и недостатки использования светодиодов

Основные преимущества светодиодов [9, 17, 18]:

– высокая надежность и долговечность, что обеспечивает большой срок службы (100 тыс. ч) и уменьшает расходы на эксплуатацию оборудования;

- компактность;
- большая ударная и вибрационная прочность;
- экологическая безопасность (не содержат в своем составе ртути);
- высокое быстродействие и стабильность отклика на воздействие управляющей схемы;
- низкий уровень собственных шумов и высокая помехоустойчивость;
- низкое энергопотребление, высокая по сравнению с лампами накаливания светоотдача;
- высокий уровень электро- и пожаробезопасности (имеют низкое рабочее напряжение);
- регулируемая интенсивность;
- чистота и разнообразие цветов, направленность излучения, что дает разработчикам разнообразные возможности их применения;
- диапазон рабочей температуры: от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- светодиоды не требуют использования цветных светофильтров, в отличие от ламп с неоном, имеют практически неограниченные возможности «игры» со спектрами.

Технико-экономическую целесообразность светодиодных светильников можно рассмотреть на примере уличного освещения. При строительстве новых дорог, где самым затратным элементом является строительство и установка трансформаторных подстанций, при использовании традиционных источников света, таких как ДРЛ, ДНАТ, МГЛ на один километр в среднем устанавливается до 33 опоры освещения, для электропитания которых требуется один трансформатор. Установка светодиодных светильников, которые потребляют в 4 раза меньше электроэнергии, позволяет установить один трансформатор на 4 км. С учетом стоимости трансформаторов от 3 до 5 миллионов рублей, экономия ощутима уже в момент строительства. Также необходимо учитывать, что для светодиодных светильников и фонарей требуется кабель меньшего сечения.

Несмотря на вышеперечисленные достоинства светодиодов, до сих пор процент потребителей перешедших на светодиодные лампы невелик.

Главная причина – слишком высокая цена. Отношение доллар/люмен для обычной лампы накаливания – приблизительно 0,001. А сверхъяркие светодиоды в настоящее время могут достигать лишь отношения 0,04–0,02 доллара за люмен.

Вторая причина заключается в том, что световой поток, который испускает обычный 5 мм светодиод, работающий на 20 мА, – всего 1–3 лм. Лампы накаливания и галогенные лампы излучают поток в несколько

сотен люменов. Для их замены потребуется десятки и даже сотни маломощных светодиодов, а общий размер светильника был бы слишком велик, чтобы вписаться в место установки. Поэтому в светильниках стараются использовать сверхъяркие светодиоды.

Третья причина – качество светодиодов. Благодаря не тепловой природе излучения светодиодов, отсутствие нити накала теоретически должно обуславливать фантастический срок службы. В то время как лампы накаливания имеют срок службы около 1000 ч, производители сверхъярких светодиодов декларируют 100000 ч, то есть более 11 лет непрерывной работы. На самом деле это число вводит потребителя в заблуждение: как и у всех других источников света, параметры светодиодов ухудшаются с течением времени, и эта деградация связана с такими факторами, как величина прямого тока, теплоотвод, тип и качество используемых чипов. В настоящее время нет никакого стандарта, определяющего срок службы для светодиодов, хотя существуют предложения от авторитетных организаций считать таковым сроком время, в течение которого световой поток уменьшается до некоторого значения (до 70 % или 50 %) от начальной величины.

Качественные изделия известных производителей стоят все еще дорого, и во многих случаях их применение не оправдано. Тем не менее, компаниям на рынке оптоэлектронных компонентов удалось объединить дешевую китайскую сборку, высококачественные материалы корейского и японского производства и передовые мировые технологии. Это позволило уже сейчас решить ценовую проблему при сохранении качественных показателей на уровне изделий от мировых лидеров, таких как Osram Opto Semiconductors, Lumileds, Nichia и т.п.

Еще одним недостатком светодиодов является низкое рабочее напряжение, то есть необходимость использования понижающих трансформаторов и выпрямителей.

Светодиоды имеют маленькую поверхность и, следовательно, являются сосредоточенными источниками света. Поэтому их использование в помещениях создает опасность ослепления от весьма яркого света и, как следствие, – ухудшение условий видимости, что необходимо учитывать при проектировании осветительных установок и соответствующей осветительной арматуры.

Контрольные вопросы

1. Как устроен светодиод?
2. Назовите основные способы создания светодиодов белого свечения.
3. Опишите конструктивные особенности светодиодов.
4. Укажите преимущества и недостатки полупроводниковых источников света.
5. Назовите основных производителей светодиодов.
6. Что такое излучательная рекомбинация?
7. Что такое инжекция?
8. Что такое межпримесная рекомбинация?
9. Как делятся светодиоды в зависимости от применения?
10. Назовите преимущества полимерной герметизации светодиодов.
11. Классифицируйте светодиоды по конструкции.
12. Укажите разновидности светодиодов.
13. Дайте характеристику органическим светодиодам.
14. Что используют в качестве кристаллодержателя?
15. От чего зависит цвет свечения светодиодов?

4. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

4.1. Развитие электрических источников света в хронологическом порядке

Основные вехи развития электрических источников излучения представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Хронология развития электрических источников излучения

Год	Сведения о событии
1	2
1802	Свечение тлеющего разряда и дуга между угольными стержнями в опытах В.В. Петрова
1807	Электрическая дуга между угольными стержнями английского физика Г. Дэви
1840	Немецкий физик У.Р. Грове использует для подогрева нити накала электрический ток
1844	Т. Старр в Америке делает попытку создать лампу с угольной нитью
1845	Кинг в Лондоне получает патент «Применение накаливаемых металлических и угольных проводников для освещения»
1854	Х. Гебель создает в Америке первую лампу с угольной нитью и освещает ею витрину своего магазина
1860	Появление первых ртутных разрядных трубок в Англии
1860	Х. Гейслер изобретает вакуумную светящуюся трубку
1872	Первая угольная лампа накаливания Л.Н. Лодыгина (Россия)
1876	Изобретение Н.П. Яблочковым (Россия) электрической свечи, состоящей из двух параллельных угольных стержней
1877	Максим в США изобрел лампу без колбы из платиновой ленты
1878	Сван в Англии предложил лампу с угольным стержнем и конструкцию фокусирующего патрона
1878	Т.А. Эдисон в США предложил лампу с платиновой завитой проволокой
1879	Т.А. Эдисон разрабатывает системы освещения лампами накаливания (резьбовой цоколь, патрон, выключатель, центральное электропитание)
1880	Т.А. Эдисон получает патент на лампу с угольной нитью
1882	Фирма «Сименс» производит лампы с угольными нитями
1897	Нернст изобретает лампу с металлической нитью накаливания
1901	Купер-Хьюит (США) изобретает ртутную лампу низкого давления
1903	Первая лампа накаливания с танталовой нитью, предложенная Больтенем.
1905	Ауэр предлагает лампу с вольфрамовой спиралью
1906	Кюх изобретает ртутную дуговую лампу высокого давления
1907	С.Д. Паунд наблюдает электролюминесценцию неорганических кристаллов
1909	Патент Скаупи (Германия) на использование в лампах накаливания галогенных соединений
1908	Начало выпуска первых ламп накаливания с вольфрамовым телом накала (General Electric. Philips)

1	2
1913	Газонаполненная лампа Ленгмюра с вольфрамовой спиралью
1923	О.В. Лосев, советский ученый, впервые заметил явление электролюминесценции кристаллов («свечение Лосева»)
1926	Первая лампа накаливания с двойной спиралью
1929	Первая лампа накаливания с матовым стеклом
1931	Пирани изобретает натриевую лампу низкого давления
1936	Разработка в СССР образца люминесцентной лампы низкого давления с аргоно-ртутным наполнением
1938	Освоение серийного выпуска первых линейных люминесцентных ламп с галофосфатными люминофорами (General Electric, Philips, Osram)
1939	О.В. Лосев теоретически объяснил появление свечения при пропускании тока через <i>p-n</i> -переход полупроводников
1939	Повышение световой отдачи биспиральных ламп накаливания за счет криптонового наполнения
1940	Заявка В.Л. Фабриканта на открытие вынужденного излучения и возможность создания среды, усиливающей проходящее через нее излучение. Диплом на открытие с приоритетом от 1951 г. (совместно с М.М. Вудынским и Ф.Л. Бутаевой)
1946	Шульц предлагает ксеноновую лампу
1946	Ртутная лампа высокого давления с люминофором
1947	Дестрио (Франция) открывает электролюминесценцию
1958	Первые галогенные лампы накаливания (General Electric, Osram, Philips)
1962	Начало производства и использование в установках наружного и производственного освещения натриевых ламп высокого давления типа Lucalox (General Electric)
1962	Начало массового производства красных светодиодов со световой отдачей 0,1 лм/Вт (General Electric)
1964	Нобелевская премия Н.Г. Басову, А.М. Прохорову и Ч. Таунсу за фундаментальные исследования в области квантовой электроники
1969	Внедрение металлогалогенных ламп со светящими добавками на базе йодидов редкоземельных элементов (Osram, Philips)
1978	Создание первых компактных люминесцентных ламп (Philips)
1982	Галогенные лампы накаливания низкого напряжения (General Electric, Philips)
1985	Компактные люминесцентные лампы со встроенным электронным ПРА и резьбовым цоколем (Philips, Osram, General Electric)
1988	Разработка маломощных натриевых ламп высокого давления с улучшенной цветопередачей (Philips)
1991	Безэлектродные ЛЛ типа QL с рабочей частотой 2,65 МГц и сроком службы 60 тысяч ч (Philips)
1992	Безэлектродные сверхвысокочастотные серные лампы с СВЧ накачкой на частоте 2,45 ГГц (Fusion Lighting Co, USA)
1994	Безэлектродные индукционные лампы типа Genura с встроенными высокочастотными аппаратами (General Electric Lighting)
1997	Безэлектродные индукционные ЛЛ типа Endura (Osram)
2001	Нобелевская премия Ж.И. Алферову (Россия), Г. Кремер (США) и Дж. Килби (США) за фундаментальные исследования в области полупроводников, гетероструктур и приборов на их основе, в том числе светодиодов

Данная хронология событий свидетельствует о том, что развитие технологий основных видов источников света шло параллельно. Не наблюдалось в истории скачкообразных переходов от одних источников оптического излучения к другим. Ни один вид источников света не постигло забвение. Мировая практика такова, что одна и та же производственная организация может заниматься выпуском различных по принципу действия и энергоэффективности источников света.

4.2. Термоизлучающие источники света

Все источники излучения оптического диапазона сравнивают, прежде всего, с лампами накаливания.

Лампа накаливания – это электрический источник света антропогенного характера, в котором тугоплавкий проводник является телом накала, помещенным в прозрачный вакуумированный или заполненный инертным газом сосуд, нагревается до высокой температуры за счет протекания через него электрического тока, в результате чего излучает в широком спектральном диапазоне, в том числе видимый свет. В качестве тела накала используется, в основном, спираль из сплавов на основе вольфрама. В зависимости от вида газового наполнителя различают вакуумные, аргоновые, криптоновые, ксеноновые, галогенные, ксенон-галогенные лампы накаливания. Лампы накаливания по сравнению с другими электрическими источниками света получили самое широкое распространение и применение.

Особенности конструкции. Конструкции ламп накаливания (рис. 4.1) весьма разнообразны и зависят от назначения. Однако общими являются тело накала, колба и токовводы [7, 9, 10, 19].

В зависимости от особенностей конкретного типа лампы могут применяться держатели тела накала различной конструкции. Крючки-держатели тела накала ламп накаливания изготавливаются из молибдена. Лампы могут изготавливаться бесцокольными или с цоколями различных типов, иметь дополнительную внешнюю колбу и иные дополнительные конструктивные элементы.

Предохранитель рассчитан таким образом, чтобы при зажигании дуги он разрушался под воздействием тока дуги, существенно превышающего номинальный ток лампы. Ферроникелевое звено находится в полости, где давление равно атмосферному, а потому дуга легко гаснет. В настоящее время от их применения отказались.

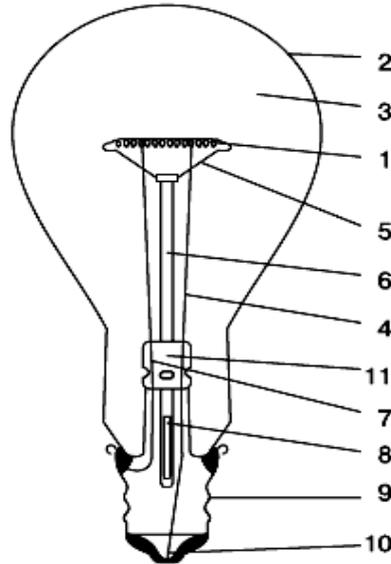


Рис. 4.1. Конструкция современной лампы накаливания:
 1 – тело накала; 2 – колба; 3 – полость колбы; 4,7 – электроды (токовые вводы);
 5 – крючки-держатели тела накала; 6 – ножка лампы; 8 – штенгель;
 9 – корпус цоколя; 10 – нижний контакт цоколя; 11 – лопатка

Колба защищает тело накала от воздействия атмосферных газов. Размеры колбы определяются скоростью осаждения материала тела накала.

Колбы первых ламп были вакуумными. Большинство современных ламп наполняются химически инертными газами. Потери тепла, возникающие при этом за счет теплопроводности, уменьшают путем выбора газа с большой молярной массой. Смеси азота N_2 с аргоном Ar являются наиболее распространенными в силу малой себестоимости, также применяют чистый осушенный аргон, реже – криптон Kr или ксенон Xe.

Особой группой являются **галогенные лампы накаливания**. Принципиальной их особенностью является введение в полость колбы галогенов или их соединений. В такой лампе испарившийся с поверхности тела накала металл вступает в соединение с галогенами и затем возвращается на поверхность нити за счет температурного разложения получившегося соединения. Такие лампы имеют большую температуру спирали, большой КПД и срок службы, меньший размер колбы и другие преимущества. Серьезным недостатком является очень низкое электрическое сопротивление галогеновой лампы в холодном состоянии [7, 9, 10, 19].

Галогенные лампы накаливания благодаря своей компактности применяют для создания направленного освещения (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Внешний вид современных галогенных ламп накаливания

Формы тел накала весьма разнообразны и зависят от функционального назначения ламп. Наиболее распространенным является тело накала из проволоки круглого поперечного сечения, однако находят применение и ленточные тела накала.

Тело накала первых ламп изготавливалось из угля. В современных лампах применяются спирали из осмиево-вольфрамового сплава. Для уменьшения размеров тела накала ему обычно придаётся форма спирали, иногда спираль подвергают повторной или даже третичной спирализации, получая соответственно биспираль или триспираль. КПД таких ламп выше за счёт уменьшения теплопотерь из-за конвекции.

Лампы изготавливают для различных рабочих напряжений. Так как металлы имеют малое удельное сопротивление, для достижения такого сопротивления необходим длинный и тонкий провод. Толщина провода в обычных лампах составляет 40–50 мкм.

Лампы накаливания включают в электрическую сеть между фазным и нулевым проводами (рис. 4.3). К верхнему контакту патрона подсоединяют фазный провод, а к боковой резьбе – нулевой. Выключатель устанавливают в рассечку фазного провода.

Так как при включении нить накала находится при комнатной температуре, ее сопротивление на порядок меньше рабочего сопротивления. Поэтому при включении протекает очень большой ток, примерно в десять раз больше рабочего тока. По мере нагревания нити ее сопротивление увеличивается и ток уменьшается. В отличие от современных ламп, ранние лампы накаливания с угольными нитями при включении работали по обратному принципу – при нагревании их сопротивление уменьшалось, и свечение медленно нарастало.

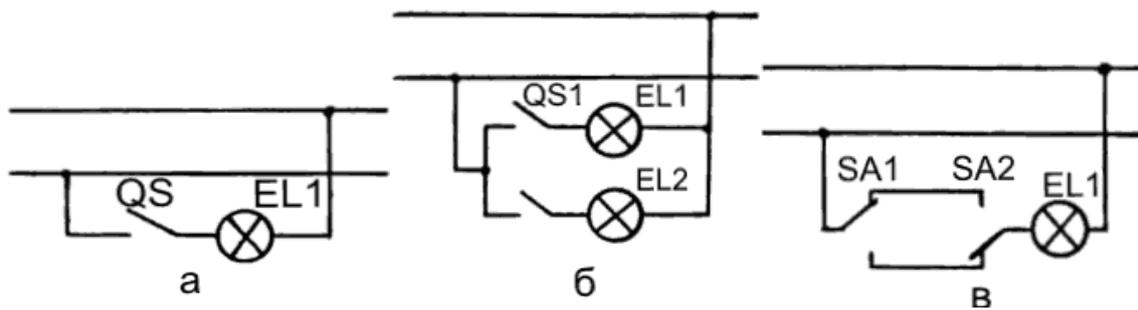


Рис. 4.3. Схемы включения электрических ламп накаливания:
 а – выключателем однополюсным; б – выключателем однополюсным на две цепи;
 в – управление из двух мест при помощи переключателей

В мигающих лампах последовательно с нитью накала встраивается биметаллический переключатель. За счет этого такие лампы самостоятельно работают в мерцающем режиме.

Форма цоколя с резьбой обычной лампы накаливания была предложена Джозефом Уилсоном Суоном. Размеры цоколей стандартизованы. У ламп бытового применения наиболее распространены цоколи Эдисона Е14, Е27 и Е40 (число обозначает наружный диаметр в миллиметрах). Также встречаются цоколи без резьбы, а также бесцокольные лампы.

Лампы накаливания метрологические предназначены для хранения и передачи размеров световых потоков и сил света (светоизмерительные) и температурных единиц (температурные), а также для аттестации и проверки контрольно-измерительных установок и изделий.

Лампы типов ТРВ 1873, ТРВ 1873-1, 2273, 2273-1, 800-2300, 800-2300-1, ТРИ 1573, 1573-1, 1873, 1873-1, 1073-2073), 673-2273 работают от сети постоянного тока (направление тока указано на колбе). Остальные типы ламп – от сети переменного тока частоты 50 Гц.

Рабочее положение ламп: вертикальное, цоколем вверх (СИП, ТРВ 800-2300, 800-2300-1, ТРИ 1073-2073, 673-2273; вертикальное цоколем вниз (СИС, ТРВ 1873, 1873-1, 2273, 2273-1, ТРИШ 2850-300) и горизонтальное (ТРИ 1573, 1573-1, 1873, 1873-1, ТРВ 800-1400).

Эксплуатация ламп при параметрах, превышающих паспортные данные, недопустима ввиду резкого снижения продолжительности горения.

В структуре условного обозначения ламп накаливания метрологических ХХ-Х-Х: на первом месте – буквенное обозначение (СИС – светоизмерительная для измерения силы света; СИП – светоизмерительная для измерения светового потока; СИРШ – светоизмерительная рабочая широкодиапазонная; ТР – температурная рабочая; В – для

воспроизведения температуры в видимой области спектра излучения; И – для воспроизведения температуры в инфракрасной области спектра излучения; У – для воспроизведения температуры в ультрафиолетовой области спектра; Ш – широкодиапазонная; ПТ – повышенной точности); на втором – номинальное напряжение, В (3; 3,5; 5; 6; 8,5; 10; 35; 40; 107) или предел воспроизведения яркостных температур тела накала, К (1573; 1873; 2273; 2607; 673-2273; 1073–2073; 2850–3000); на третьем – номинальная сила света, кд (1; 5; 10; 35; 100; 500; 1000; 1500); или номинальная мощность, Вт (40; 100; 200; 730); или пределы воспроизведения яркостных температур, °С (800–1400; 1100–2350); на четвертом – отличительная особенность от базовой модели (1) или номинальный световой поток, лм (10; 50; 150; 500; 1500; 3500; 10000).

Принцип действия. В лампе накаливания используется эффект нагревания проводника, называемого телом накаливания, при протекании через него электрического тока. Температура тела накаливания повышается после замыкания электрической цепи. Все тела, температура которых превышает температуру абсолютного нуля температур, излучают электромагнитное тепловое излучение в соответствии с законом Планка. Спектральная плотность мощности излучения в соответствии с функцией Планка имеет максимум, длина волны которого на шкале длин волн зависит от температуры. Положение максимума в спектре излучения в соответствии с законом смещения Вина сдвигается с повышением температуры в сторону меньших длин волн. Для получения видимого излучения необходимо, чтобы температура излучающего тела превышала 570 °С, то есть температуру начала красного свечения, видимого человеческим глазом в темноте. Для зрения человека оптимальный, физиологически самый удобный, спектральный состав видимого света отвечает излучению абсолютно чёрного тела с температурой поверхности фотосферы Солнца 5770 К. Так как неизвестны вещества, способные без разрушения выдержать температуру фотосферы Солнца, в телах накаливания современных ламп накаливания применяется тугоплавкий и относительно недорогой металлический вольфрам – элемент, рекордный по высоте температуры плавления. Рабочие температуры вольфрамовых нитей ламп накаливания лежат в пределах 2000–2800 °С. Поэтому спектр ламп накаливания смещен в красную часть спектра. Чем меньше температура тела накаливания, тем меньшая доля энергии, подводимой к нагреваемой проволоке, преобразуется в полезное видимое излучение, и тем более «красным» кажется излучение.

Часть потребляемой электрической энергии лампы накаливания преобразует в видимое излучение, часть рассеивается в виде тепла в результате процессов теплопроводимости и конвекции наполняющего газа внутри колбы лампы. Только малая доля электромагнитного излучения лежит в области видимого света, основная доля приходится на инфракрасное излучение. Для повышения КПД лампы и получения максимально «белого» света необходимо повышать температуру нити накала, которая в свою очередь ограничена свойствами материала нити – температурой плавления. Температура в 5771 К недостижима, так как при такой температуре любой известный материал плавится, разрушается и перестает проводить электрический ток. В современных лампах накаливания применяют материалы с максимальными температурами плавления – вольфрам, температура плавления которого составляет 3410 °С, и осмий с температурой плавления равной 3045 °С.

Для оценки физиологического качества светильников используется понятие цветовой температуры. При типичных для ламп накаливания температурах 2200–2900 К излучается желтоватый свет, отличный от дневного. В вечернее время «теплый» (< 3500 К) свет более комфортен для человека и меньше подавляет естественную выработку мелатонина, важного для регуляции суточных циклов организма.

В атмосферном воздухе при высоких температурах вольфрам быстро окисляется в триоксид вольфрама, образуя характерный белый налет на внутренней поверхности лампы при потере ею герметичности. По этой причине вольфрамовое тело накала помещают в герметичную колбу, из которой в процессе изготовления лампы откачивается воздух и затем заполняется инертным газом – обычно аргоном. На заре индустрии ламп их изготавливали с вакууммированными колбами. В настоящее время только лампы малой мощности (до 25 Вт) изготавливают в вакууммированной колбе. Колбы более мощных ламп наполняют инертным газом – азотом, аргоном или криптоном. Повышенное давление в колбе газонаполненных ламп уменьшает скорость испарения вольфрамовой нити. Это не только увеличивает срок службы лампы, но и позволяет повысить температуру тела накаливания. Таким образом, световой КПД повышается, а спектр излучения приближается к белому. Внутренняя поверхность колбы газонаполненной лампы медленнее темнеет при распылении материала тела накала в процессе работы, как у вакууммированной лампы.

Все чистые металлы, а также их сплавы, и в частности вольфрам, имеют положительный температурный коэффициент сопротивления, что означает увеличение электрического удельного сопротивления с ростом температуры. Эта особенность автоматически стабилизирует электрическую потребляемую мощность лампы на ограниченном уровне при подключении к источнику напряжения, то есть источнику с низким выходным сопротивлением, что позволяет подключать лампы непосредственно к электрическим распределительным сетям без использования ограничивающих ток балластных реактивных или активных двухполюсников, что экономически выгодно отличает их от газоразрядных ламп.

4.3. Сравнение достоинств и недостатков электрических источников света

Преимуществами ламп накаливания являются:

- высокий индекс цветопередачи;
- налаженность в массовом производстве;
- низкая цена;
- небольшие размеры;
- отсутствие пускорегулирующей аппаратуры;
- нечувствительность к ионизирующей радиации;
- чисто активное электрическое сопротивление;
- мгновенное зажигание;
- невысокая чувствительность к сбоям в питании и скачкам напряжения;
- отсутствие токсичных компонентов и как следствие отсутствие необходимости в инфраструктуре по сбору и утилизации;
- возможность работы на любом роде тока;
- нечувствительность к полярности напряжения;
- возможность изготовления ламп на самое разное напряжение;
- незаметность мерцания при работе на переменном токе;
- отсутствие гудения при работе на переменном токе, вследствие отсутствия электронного балласта, драйвера или преобразователя напряжения;
- устойчивость к электромагнитному импульсу;
- возможность использования регуляторов яркости;

- отсутствие боязни низкой и повышенной температуры окружающей среды, устойчивость к конденсату;

- непрерывный спектр излучения.

Имеются следующие *недостатки ламп накаливания*:

- низкая световая отдача;

- относительно малый срок службы;

- хрупкость, чувствительность к удару и вибрации;

- бросок тока при включении;

- возможность взрыва баллона при термоударе или разрыве нити под напряжением;

- резкая зависимость световой отдачи и срока службы от напряжения;

- пожарная опасность лампы накаливания.

Через 30 мин после включения ламп накаливания температура наружной поверхности достигает, в зависимости от мощности, следующих величин: 25 Вт – 100 °С, 40 Вт – 145 °С, 75 Вт – 250 °С, 100 Вт – 290 °С, 200 Вт – 330 °С;

- необходимость термостойкой арматуры светильников при нагреве частей лампы.

Газоразрядные люминесцентные лампы по сравнению с лампами накаливания имеют следующие *преимущества*:

- значительно большая светоотдача;

- разнообразие оттенков света;

- рассеянный свет;

- длительный срок службы.

Газоразрядные люминесцентные лампы по сравнению с лампами накаливания имеют следующие недостатки:

- химическая опасность (содержат ртуть);

- неравномерный, линейчатый спектр, неприятный для глаз и вызывающий искажения цвета освещённых предметов;

- изменение спектра, уменьшение светоотдачи и как следствие понижение КПД, возникающие со временем при деградации люминофора;

- мерцание лампы;

- необходимость дополнительной пускорегулирующей аппаратуры;

- низкий коэффициент мощности.

Данные об энергоэффективности плазменных и полупроводниковых источников оптического излучения приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Сравнение энергоэффективности плазменных и полупроводниковых источников оптического излучения

Категория	Тип	Световая отдача (лм/Вт)	КПД, %
На основе горения	свеча	0,3	0,04
	газовая горелка	2	0,3
Лампа накаливания	5 Вт лампа накаливания (120 В)	5	0,7
	40 Вт лампа накаливания (120 В)	12,6	1,9
	100 Вт лампа накаливания (120 В)	16,8	2,5
	100 Вт лампа накаливания (220 В)	13,8	2,0
	100 Вт галогенная лампа (220 В)	16,7	2,4
	2,6 Вт галогенная лампа (5,2 В)	19,2	2,8
	кварцевая галогенная лампа (12–24 В)	24	3,5
	высокотемпературная лампа	35	5,1
Люминесцентная лампа	5–24 Вт компактная флюоресцентная	45–60	6,6–8,8
	T12 линейная, с магнитным балластом	60	9
	T8 линейная, с электронным балластом	80–100	12–15
	T5 линейная	70–100	10–15
Светодиод	белый светодиод	10 – 97	1,5–13
	белый OLED	102	15
	прототип светодиода	до 254	до 35
Дуговая лампа	ксеноновая дуговая лампа	30–50	4,4–7,3
	дуговые ртутные металлогалогенные лампы	50–55	7,3–8,0
Газоразрядная лампа	натриевая лампа высокого давления	150	22
	натриевая лампа низкого давления	183 – 200	27–29
	металлогалогенная лампа	65–115	9,5–17
	1400 Вт серная лампа	100	15
Теоретический предел		683	100

Контрольные вопросы

1. Опишите кратко хронологию развития электрических источников излучения.
2. Назовите основные разновидности термоизлучающих электрических источников света.
3. Опишите конструктивные особенности ламп накаливания.
4. Опишите конструктивные особенности галагеновых ламп накаливания.
5. Укажите основные преимущества ламп накаливания.
6. Укажите основные недостатки ламп накаливания.
7. Укажите основные преимущества газоразрядных люминесцентных ламп по сравнению с лампами накаливания.
8. Укажите основные недостатки газоразрядных люминесцентных ламп по сравнению с лампами накаливания.
9. Проведите сравнение энергоэффективности плазменных и полупроводниковых источников оптического излучения.

ГЛОССАРИЙ

Абсолютное фотометрирование – стандартный метод измерения светового потока и распределения света светодиодных световых приборов.

Аддитивное смешение цветов – цветовая модель *RGB*, описывающая образование цветов путем сложения в разных пропорциях трех первичных цветов – красного, зеленого и синего. При аддитивном смешении цветов синтез красного, зеленого и синего света в равных пропорциях дает белый свет.

Балласт – электронная схема, обеспечивающая нужные электрические условия для зажигания и работы люминесцентных ламп и разрядные лампы высокого давления.

Видимый свет – оптическое излучение с длинами волн $0,38 < \lambda < 0,76$ мкм ($380 < \lambda < 760$ нм).

Гониофотометр – фотометрический прибор для измерения распределения интенсивности излучения, КПД и светового потока световых приборов.

Индекс цветопередачи – параметр, характеризующий способность источника света правильно передавать цвета различных объектов в сравнении с идеальным источником света. Максимальное приближение к параметрам эталонного источника света характеризуется индексом цветопередачи, равным 100 %.

Инфракрасное излучение – оптическое излучение с длинами волн в пределах $0,75 < \lambda < 1000$ мкм.

Контроллер – устройство, с помощью которого выполняется регулирование светового потока прибора изменяемого цвета свечения или белого света с настраиваемой цветностью. Контроллеры обычно включают в себя программные компоненты для настройки конфигурации осветительной системы и для создания световых шоу с помощью отправки световым приборам соответствующих команд.

Когерентная волна – электромагнитная волна, амплитуда, частота, фаза, направление распространения и поляризация которой постоянны или изменяются по определенному закону.

Конвекция – явление вынужденного или самопроизвольного переноса теплоты в жидкостях или газах путем перемешивания самого вещества.

Литые радиаторы – в производстве изделий такого типа используется технология литья в пресс-форму под давлением. Применение такой технологии позволяет получать профили реберной поверхности практически любой сложности, значительно улучшая передачу.

Лучистый теплообмен – теплообмен, осуществляемый в результате процессов превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса энергии излучения и ее поглощения веществом.

Монохроматическая волна – гармоническая волна, имеющая определенную длину волны и строго постоянную частоту.

Оптическое излучение – электромагнитное излучение с длинами волн $\lambda = 0,1\text{--}1000$ мкм.

Освещенность (E , лк) – отношение светового потока к площади поверхности, на которую он падает.

Показатель преломления среды – отношение скорости света в среде V к скорости света в вакууме c_0 ($c_0 = 2,997925 \cdot 10^8$ м/с): $n = \frac{c_0}{V}$.

Поляризованное излучение – излучение с некоторым преимущественным направлением колебаний вектора электрического поля.

Радиатор – устройство для рассеивания тепла в воздухе излучением и конвекцией. В светотехнике для охлаждения электронных компонентов и силовых элементов применяют металлические пластины с ребрами и пассивные игольчатые радиаторы.

Световой луч – линия (или вектор), совпадающая с направлением скорости распространения световой волны.

Световод – оптический волновод, представляющий собой в наиболее простом виде длинную гибкую двухслойную коаксиальную нить.

Стерadian (ср) – телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающей на ее поверхности площадь, которая соответствует по величине площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Тепловое сопротивление – способность тела (поверхности, слоя или его части) препятствовать прохождению теплового потока. Единица измерения – градус на ватт.

Теплопроводная паста – вязкая субстанция с высокой теплопроводностью, используемая для уменьшения теплового сопротивления между двумя соприкасающимися поверхностями.

Ультрафиолетовое излучение – оптическое излучение с длинами волн в пределах $0,10 < \lambda < 0,38$ мкм.

Электромагнитная волна – система периодически изменяющихся электрических и магнитных полей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Храмов, Ю.А. Физики: биографический справочник / Ю.А. Храмов; под ред. А. И. Ахиезера. –2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
2. Гацура, Г. Свет и стили. Энциклопедия осветительных приборов / Г. Гацура. – М.: АРТ-Корона, 2015. – 528 с.
3. Пат. 2281431 Российская Федерация, МПК F21L 17/00 (2006.01). Лампа с фитильной горелкой / Дятленко В.А.; заявитель и патенто-обладатель ООО «Металлообрабатывающий завод». – № 2004132386/28; заявл. 10.11.2004; опубл. 10.08.2006, Бюл. № 22.
4. Чернов, С. Бейкер-стрит и окрестности. Эпоха Шерлока Хомса / С. Чернов – М.: Форум, 2015. – 480 с.
5. Лёвшин, В.Л. Сергей Иванович Вавилов. Очерки и воспоминания / В.Л. Лёвшин, А.Н. Теренин, И.М. Франк. –3-е изд., доп. – М.: Наука, 1991. – 376 с.
6. Варфоломеев, Л.П. Элементарная светотехника / Л.П. Варфоломеев; под ред. проф. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Знак, 2008. – 220 с.
7. Гуторов, М.М. Основы светотехники и источники света: учебное пособие для вузов по специальности «Светотехника и источники света» / М.М. Гуторов – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.
8. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Знак, 2006.– 972 с.
9. Козловская, В.Б. Электрическое освещение: справочник / В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, В.Н. Сацукевич. – 2-е изд. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 271с.
10. Лейви, А.Я. Основы светотехники: учебное пособие / А.Я. Лейви, А.А. Шульгинов; под ред. А.А. Шульгинова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 71 с.
11. Дойников, А.С. Цветовая температура // Физическая энциклопедия: [в 5 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров. – М.: Большая российская энциклопедия, 1999. – Т. 5: Стробоскопические приборы – Яркость. – С. 422. – 692 с.
12. Балласт для люминесцентной лампы на IR2151. Схема и описание [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.joyta.ru/3907-ballast-dlya-lyuminescentnoj-lampy-na-ir2151> – (дата обращения: 14.06.18).
13. Мальков М. Серная лампа. Многообещающее начало и... непрогнозируемое будущее? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2195/doc/56392> (дата обращения: 19.06.18).

14. Безэлектродные СВЧ-разрядные лампы (S-лампы) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://nikfi222.valuehost.ru/in-detail> (дата обращения: 20.06.18).
15. Ларюшин, А.И. Лазерная техника / А.И. Ларюшин. – Казань: ФЭн, 1995. – 121 с.
16. Коган, Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л.М. Коган – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
17. Шуберт, Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт. / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
18. Тукшаитов, Р.Х. Обеспечение энергоресурсосбережения при питании светодиодных светильников от гальванических элементов / Р.Х. Тукшаитов [и др.] // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 11–12. – С. 108–114.
19. Осветительные установки промышленных предприятий: учеб. пособие / Н.В. Денисова [и др.] – Казань: Казан.гос.энерг.ун-т., 2016. – 206 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ПРИРОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА.....	7
1.1. Четвертое состояние вещества.....	7
1.2. Естественные источники излучения оптического диапазона.....	9
1.3. Неэлектрические искусственные плазменные источники оптического диапазона на твердом топливе.....	15
1.4. Неэлектрические искусственные плазменные источники оптического диапазона на жидком топливе.....	19
1.5. Неэлектрические искусственные плазменные источники оптического диапазона на газообразном топливе.....	33
1.6. Искусственное освещение улиц неэлектрическими плазменными источниками оптического диапазона.....	40
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА.....	44
2.1. Люминесценция и люминофоры.....	44
2.2. Обобщенная характеристика газоразрядных люминесцентных ламп.....	48
2.3. Маркировка газоразрядных ламп.....	53
2.4. Особенности конструкции и принципа действия трубчатых газоразрядных люминесцентных ламп.....	55
2.5. Особенности конструкции и принципы действия компактных люминесцентных ламп.....	62
2.6. Особенности конструкции и принципа действия кварцевых ламп	66
2.7. Особенности конструкции и принципа действия индукционных ламп.....	67
2.8. Особенности конструкции и принципа действия ламп типа ДРЛ	70
2.9. Особенности конструкции и принципа действия металлогалогенных ламп.....	73
2.10. Особенности конструкции и принципа действия ламп типа натриевых газоразрядных ламп.....	75
2.11. Особенности конструкции и принципа действия ксеноновых ламп.....	78
2.12. Особенности конструкции и принципа действия серных ламп.....	82
2.13. Особенности конструкции и принципа действия плазменных ламп.....	87
2.14. Особенности конструкции и принципа действия гелий- неонового лазера.....	89

3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА.....	92
3.1. Принцип действия полупроводниковых светоизлучающих диодов.....	92
3.2. Технологии создания светодиодов белого свечения.....	96
3.3. Разновидности светодиодов.....	99
3.4. Конструкция полупроводниковых светоизлучающих диодов	101
3.5. Конструкция светодиодных ламп.....	108
3.6. Полупроводниковые лазеры.....	110
3.7. Преимущества и недостатки использования светодиодов.....	114
4. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА	118
4.1. Развитие электрических источников света в хронологическом порядке.....	118
4.2. Термоизлучающие источники света.....	120
4.3. Сравнение достоинств и недостатков электрических источников света.....	126
ГЛОССАРИЙ.....	130
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	132

Учебное издание

Шириев Равиль Рафисович

**ПЛАЗМЕННЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИСТОЧНИКИ
ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА**

Учебное пособие

Кафедра промышленной электроники и светотехники КГЭУ

Редактор издательского отдела *С.Н. Чемоданова*
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Подписано в печать 20.08.2018.

Формат 60x84/16. Бумага «Business». Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.
Усл.-печ. л. 7,90. Уч.-изд. л. 5,48. Тираж 500 экз. Заказ № 210/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, Красносельская, 51