

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**К. І. СУВОРОВА
Л. Д. ГУРАКОВА**

ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2021**

УДК 628.92/.97(075.8)

С89

Автори:

Суворова Кристина Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри світлотехніки і джерел світла;

Гуракова Лариса Дмитрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри світлотехніки і джерел світла

Рецензенти:

Є. П. Тимофєєв, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник ННЦ «Інститут метрології»;

О. Д. Купко, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник ННЦ «Інститут метрології»

*Рекомендовано до друку Вченою радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,
протокол № 8 від 29 квітня 2021 р.*

Суворова К. І.

С89 Джерела світла : навч. посібник / К. І. Суворова, Л. Д. Гуракова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 110 с.

ISBN 978-966-695-559-6

Посібник присвячено розгляду питань розробки та експлуатації джерел світла загального призначення. Метою розробки навчального посібника є створення та формування відомостей щодо конструкції, принципів дії сучасних типів джерел світла, їх основних характеристик, засобів підвищення ефективності використання джерел світла для створення необхідних і комфортних умов освітлення. Складено відповідно міжнародних і національних норм та стандартів у галузі освітлювального обладнання.

Рекомендовано студентам, аспірантам, науковцям та викладачам.

УДК 628.92/.97(075.8)

ISBN 978-966-695-559-6

© К. І. Суворова, Л. Д. Гуракова, 2021
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень.....	4
ПЕРЕДМОВА.....	5
1 ПАРАМЕТРИ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА. ТЕПЛОВІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА	6
1.1 Класифікація і параметри джерел світла.....	6
1.2 Теплові джерела світла	11
1.3 Сучасні типи ламп розжарювання.....	15
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 1.....	21
2 РОЗРЯДНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА.....	22
2.1 Особливості ртутного розряду низького тиску	23
2.2 Розрядні лампи низького тиску.....	35
2.3 Випромінювання ртутного розряду високого тиску.....	54
2.4 Розрядні лампи високого тиску	56
2.5 Інші розрядні лампи.....	64
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 2.....	75
3 СВІТЛОДІОДНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА.....	77
3.1 Історія винаходу.....	77
3.2 Принцип дії світлодіода.....	79
3.3 Класифікація світлодіодів.....	83
3.4 Особливості конструкції світлодіодів.....	85
3.5 Світлодіоди білого свічіння.....	90
3.6 Світлодіодні модулі або кластери.....	94
3.7 Світлодіодні світильники.....	98
3.8 Схеми підімкнення світлодіодів.....	101
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 3.....	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	108

Перелік умовних позначень та скорочень

БЗЖ – блок запалювання та живлення
БКЛЛ – безелектродна компактна люмінесцентна лампа
ГЛР – галогенна лампа розжарювання
ГЛ – газорозрядна лампа
ГЛВТ – газорозрядна лампа високого тиску
ГЛНТ – газорозрядна лампа низького тиску
ВЧ – висока частота
ВЧТ – високочастотний трансформатор
ДС – джерело світла
ДРЛ – дугова ртутна люмінесцентна лампа
ДРІ – металогалогенна лампа
ЕЗП – електронний запалювальний пристрій
ЕмПРА – електромагнітний пускорегулювальний апарат
ЕПРА – електронний пускорегулювальний апарат
ЕРС – електрорушійна сила
ЗП – запалювальний пристрій
ІЛ – індукційна лампа
ККД – коефіцієнт корисної дії
КЛЛ – компактна люмінесцентна лампа
КСС – крива сили світла
ЛЛ – люмінесцентна лампа
ЛР – лампа розжарювання
ЛТС – лампа тліючого світіння
МГЛ – металогалогенна лампа
МК – мікроконтролер
НЛВТ – натрієва лампа високого тиску
НЛНТ – натрієва лампа низького тиску
ОВ – оптичне випромінювання
ОП – освітлювальний прилад
ОУ – освітлювальна установка
ПВП – питома встановлена потужність
ПРА – пускорегулювальний апарат
СД – світлодіод
УФВ – ультрафіолетове випромінювання

ПЕРЕДМОВА

Світло – невіддільна частина, обов'язковий елемент нашого життя, один з активних рушіїв прогресу, незамінний атрибут навколишнього світу. Джерела світла (далі – ДС) – пристрої, що перетворюють різні види енергії на світло та є основним вузлом усіх світлотехнічних приладів і установок. На сучасному етапі електричні ДС застосовують у різних сферах діяльності людини – від освітлення приміщень, вулиць, доріг, стадіонів, аеродромів і архітектурних об'єктів до використання в оптичних технологіях у сільському господарстві, медицині, транспорті та інших суміжних областях науки і техніки. Випромінювання, яке створюють ДС, може привести до появи зорових відчуттів, має біологічну та бактерицидну дію.

Правильно підібрані ДС забезпечують енергоекономічне і комфортне освітлення, покращують умови праці людей, уможливають збереження зору і здоров'я, поліпшують психофізіологічний стан людини.

Сьогодні передові зарубіжні й вітчизняні заводи випускають величезну кількість ламп різних типів і параметрів, різноманітного призначення, що становить десятки мільярдів штук на рік.

Різноманіття і висока якість зарубіжних ДС змушують вітчизняних спеціалістів формувати нові підходи до розробки, виробництва й експлуатації ламп, які були б конкурентоздатними на світовому ринку. Досягти цієї мети неможливо без обізнаності з фізичними процесами, які відбуваються у ДС, їх параметрів, особливостей конструювання і експлуатації, а також методів розрахунку. Вирішити зазначені вище питання закликаний курс «Джерела світла», який викладається студентам спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Посібник містить три розділи, що відповідає робочій навчальній програмі курсу, а саме:

1. Параметри ДС. Теплові джерела світла.
2. Розрядні джерела світла.
3. Світлодіодні джерела світла.

1 ПАРАМЕТРИ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА. ТЕПЛОВІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

1.1 Класифікація і параметри джерел світла

Джерелом світла називається прилад, що перетворює будь-який вид енергії на енергію випромінювання оптичного діапазону спектра (області $10\text{--}10^6$ нм).

Усі штучні ДС можна розділити на три класи:

- теплові;
- розрядні;
- світлодіоди.

У теплових ДС випромінювання світла є результатом нагрівання тіла розжарювання до високих температур електричним струмом. У розрядних ДС випромінювання виникає внаслідок розряду між електродами, що перебувають у газі або парах металів. Принцип дії світлодіодів базується на випромінюванні напівпровідників у разі прикладання до них електричного струму.

Розглянемо джерела світла, які застосовуються для освітлення виробничих, адміністративно-побутових, громадських, житлових та інших приміщень, а також для освітлення територій підприємств і вуличного освітлення.

Класифікація джерел світла

За принципом перетворення електричної енергії на енергію видимого випромінювання сучасні джерела світла поділяються на дві головні групи: теплові й розрядні [1].

Тепловим називають оптичне випромінювання, що виникає під час нагрівання тіл. До теплових джерел світла відносять лампи розжарювання. Залежно від того який газ застосовується для заповнення колби лампи при виготовленні, вони поділяються на вакуумні, газоповні, галогенні, ксенонові.

Розрядною лампою називають лампу, у якій оптичне випромінювання виникає внаслідок електричного розряду в газах, парах або їх сумішах.

Розрядні лампи поділяються на розрядні лампи високого тиску (далі – РЛВТ) – ДРЛ, металогалогенні (далі – МГЛ) – ДРІ, розрядні лампи низького тиску (далі – РЛНТ) – ЛЛ, натрієві лампи низького тиску (далі – НЛНТ) – ДНаО, натрієві лампи високого тиску (далі – НЛВТ) – ДНаТ.

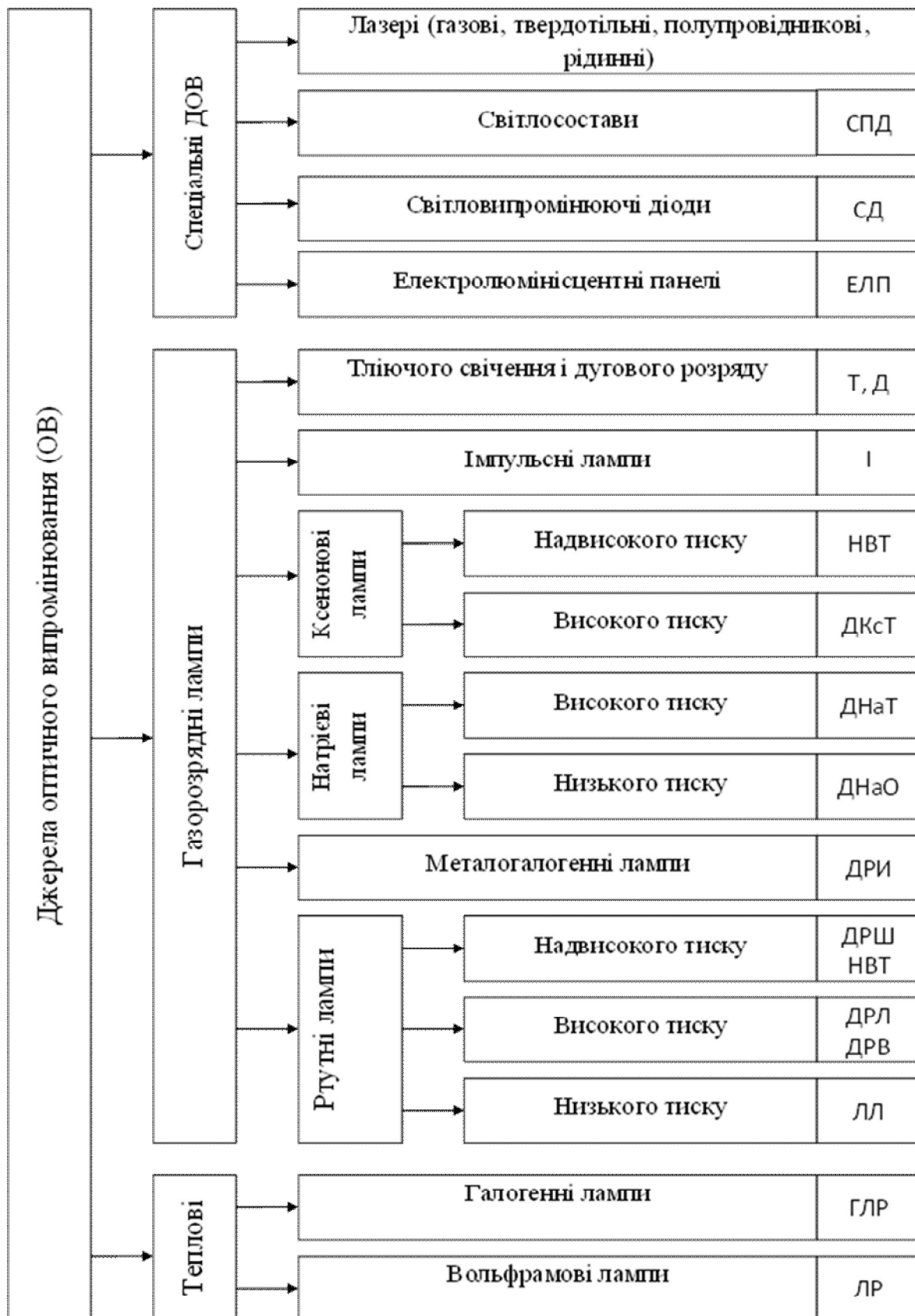


Рисунок 1.1 – Класифікація джерел світла

Параметри джерел світла

Для оцінки якості ДС і визначення ступеня їх відповідності вимогам того чи іншого застосування використовують набір показників, які всебічно характеризують їхні властивості. Ці показники називають **параметрами джерел світла** [2].

Параметри ДС поділяються на дві основні групи – технічні та експлуатаційні.

До технічних параметрів належать показники, що характеризують світлові, електричні й конструктивні параметри ламп.

До **світлових параметрів** належать:

- світловий потік Φ , лм;
- спектральна щільність світлового потоку $\varphi(\lambda)$, лм/нм;
- сила світла I , кд;
- яскравість L , кд/м²;
- спектр випромінювання;
- індекс передачі кольору R_a ;
- коефіцієнт пульсації освітленості k_n .
- кольорова температура $T_{кол}$, К;
- світлову віддачу H , лм/Вт.

Номинальний світловий потік $\Phi_{ном}$ – світловий потік, який створює лампа при номінальній потужності. Світлова віддача H – це відношення світлового потоку лампи до споживаної нею потужності, яка вимірюється в лм/Вт. Світлова віддача – це коефіцієнт корисної дії, виражений в світлових величинах.

Якість передачі кольору при освітленні штучним світлом прийнято оцінювати загальним індексом передачі кольору R_a . За стандартне джерело прийнято світло теплових випромінювачів, тобто ламп розжарювання, їх R_a за згодою міжнародних організацій дорівнює 100. При освітленні газорозрядними лампами колір предметів тою чи іншою мірою відрізняється від дійсного, який вони мають при сонячному освітленні. Що більше спотворення кольору, то нижчий індекс передачі кольору. Загальноприйнятою є така система оцінки якості передачі кольору:

- $R_a \geq 90$ – чудове;
- $90 > R_a > 80$ – дуже гарне;
- $80 > R_a > 70$ – гарне;
- $70 > R_a > 60$ – задовільне;
- $60 > R_a > 40$ – прийнятне;
- $R_a \leq 40$ – погане.

У Європі нормується ще один якісний показник освітлення – коефіцієнт пульсації освітленості k_n :

$$k_n = \frac{2(E_{\max} - E_{\min})}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100 \%,$$

де E_{\max} і E_{\min} – максимальне і мінімальне значення освітленості за напівперіод базової частоти напруги.

У міжнародних нормах зазначено, що k_n не повинен перевищувати 15–20 %.

До електричних параметрів належать:

- потужність P_l , Вт;
- напруга U_l , В;
- струм I_l , А.

Номінальна напруга $U_{ном}$ – напруга, на яку розрахована лампа або за якої вона може вмикатися за допомогою призначеної для цього спеціальної апаратури.

Номінальна потужність $P_{ном}$ – розрахункова потужність, споживана лампою при її вмиканні на номінальну напругу. Для газорозрядних ламп під номінальною потужністю розуміють розрахункову потужність, яку споживає лампа при її ввімкненні за допомогою спеціально призначеної для цього апаратури. Для деяких ламп замість номінальної потужності вказують номінальний струм. Для газорозрядних ламп іноді вказують різновид струму, оскільки деякі типи ламп, наприклад кульові ксенонові, можуть працювати тільки на постійному струмі.

До конструктивних параметрів ламп належать габаритні й настановні розміри, маса, тип цоколя, робоче положення ламп (деякі типи можуть працювати тільки в одному положенні, про що зазначається в технічній документації).

Експлуатаційні параметри характеризують ефективність, надійність, економічність джерел світла під час експлуатації. Ефективність визначається, насамперед, коефіцієнтами корисної дії (далі – ККД).

Енергетичний ККД лампи –

$$\eta_{ен} = \frac{\Phi_e}{P_l} = \frac{\int_0^{\infty} \varphi_e(\lambda) d\lambda}{P_l}, \quad (1.1)$$

де Φ_e – енергетичний потік лампи, Вт;

P_l – потужність лампи, Вт;

$\varphi_e(\lambda)$ – спектральна щільність потоку випромінювання, Вт/нм;

$d\lambda$ – інтервал довжин хвиль випромінювання, нм.

Ефективний ККД (для відповідного приймача) –

$$\eta_{ef} = \frac{\Phi_{ef}}{P_l} = \frac{\int_0^{\infty} \varphi_e(\lambda) \cdot K(\lambda) d\lambda}{P_l}, \quad (1.2)$$

де Φ_{ef} – ефективний потік випромінювання, Вт;

$K(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість приймача.

Світловий ККД –

$$\eta_{sv} = \frac{\int_0^{\infty} \varphi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{P_l}, \quad (1.3)$$

де $V(\lambda)$ – спектральна світлова ефективність випромінювання.

У разі, якщо джерело випромінювання використовується як джерело світла, оперують поняттям світлової віддачі лампи:

$$H = \frac{\Phi}{P_l} = \frac{683 \int_0^{\infty} \varphi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{P_l}, \quad (1.4)$$

де H – світлова віддача, лм/Вт;

Φ – світловий потік, лм.

Надійність – це здатність об'єкта виконувати усі задані функції за певних умов експлуатації протягом заданого часу при збереженні його основних параметрів у встановлених межах. Надійність характеризується низкою показників: безвідмовність, довговічність тощо.

Найважливішим серед експлуатаційних параметрів ДС є **термін дії**. Крім цього, роботу лампи характеризує стійкість до зовнішніх кліматичних чинників (температури, тиску і вологості навколишнього повітря), до механічних впливів і коливань напруги живильної електричної мережі.

Розрізняють повний, середній, мінімальний, корисний та гарантований терміни дії.

Під повним строком дії ($\tau_{повн}$) розуміють час горіння від початку експлуатації до моменту повної втрати працездатності (для теплових ДС – це час до перегорання тіла розжарювання; для розрядних ламп – час до втрати

здатності запалювання). Цей параметр в документації не вказують, оскільки він є величиною ймовірнісною.

Під середнім терміном дії ($\tau_{сер}$) при номінальній напрузі розуміють час роботи великої групи ламп, протягом якого 50 % їхньої кількості може вийти з ладу.

Мінімальний термін дії ($\tau_{мін}$) – це час роботи до виходу з ладу першої лампи групи. Цей параметр вказується зрідка, тільки для особливо надійних ламп спеціального призначення.

Корисний строк дії ($\tau_{кор}$) – це час від початку експлуатації до моменту відхилення одного з параметрів за встановлену межу, що спричиняє недоцільність використання лампи.

Здебільшого нормується **гарантований термін дії (τ)** – час, протягом якого ймовірність відмови ламп не перевищує встановленого значення. Наприклад, для ламп типу ЛБ8-6 гарантований термін дії складає 5 000 годин у разі ймовірності безвідмовної роботи лампи протягом цього терміну не нижче 0,95.

1.2 Теплові джерела світла

Лампи розжарювання (далі – ЛР) є джерелами світла теплового випромінювання, видиме випромінювання яких створюється внаслідок нагрівання електричним струмом вольфрамової нитки [3].

Конструкція лампи розжарювання

Найрозповсюдженіша освітлювальна ЛР загального призначення (рис. 1.2).

Лампа складається з таких деталей: скляна колба (1) – виготовляється зі скла молібденової або платинової груп; наповнення ламп інертним газом обумовлено їхнім призначенням, напругою живлення і конструкцією тіла розжарювання (далі – ТР); ТР (2) виготовляється із вольфрамового (зі спеціальними присадками) витягнутого дроту, зазвичай завитого у спіраль чи біспіраль; молібденові гачки (3) – призначені для надання певної форми ТР та зменшення його провисання у процесі експлуатації; штабик (5) – скляна трубка, яка у верхній частині має потовщення – лінзочку (4), у яку вставляють гачки; частина (6) – внутрішні, середні і зовнішні ланцюги електрода відповідно. Внутрішній ланцюг виготовляється з міді та платиніту (вакуумні лампи) або нікелю (газонаповнені лампи). Середній ланцюг електрода, за допомогою якого здійснюється герметичне впаювання у скло, виготовляється з платиніту або молібдену. Тарілка з розгорнутою нижньою частиною і опресованою верхньою

– лопатка (7) слугує для з'єднання штабика, електродів і штангеля (8). Останній призначений для відкачування та наповнення лампи. Цоколь лампи, що складається з металеві (латуні або оцинкованої сталі) склянки (9), до якої приєднаний один з електродів, за допомогою спеціальної мастики кріпиться до колби лампи. Другий електрод приварюється до контактної шайби цоколя (11), ізолюваної від склянки скломасою (10) [2, 3].

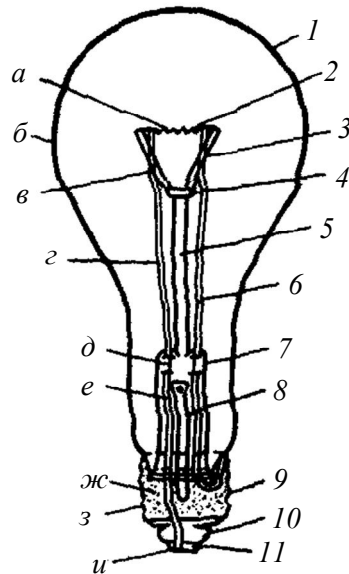


Рисунок 1.2 – Конструкція ламп розжарювання загального призначення:
 1 – колба; 2 – спіраль; 3 – гачки (держак); 4 – лінза; 5 – штабик; 6 – електроди;
 7 – лопатки; 8 – штангель; 9 – цоколь; 10 – ізолятор; 11 – нижній контакт;
 а – вольфрам; б – скло; в – молибден; г – нікель; д – мідь; ж – цокольна
 мастика; з – латунь, сталь; і – свинець, олово

Принцип дії ламп розжарювання

Принцип дії освітлювальних ЛР базується на випромінюванні відповідних довжин хвиль шляхом, з одного боку, електронного збудження молекул і атомів, з другого – теплового коливання ядер молекул тіла розжарювання. Під час підвищення температури ТР збільшується енергія поступального, коливального та обертального руху його частинок, унаслідок чого зростає потік випромінювання і середня енергія фотона. Довжини хвиль випромінювання зміщуються в коротко-хвильову інфрачервону й далі – у довгохвильову видиму область. Подальше збільшення температури ТР забезпечує енергію, достатню для електронного збудження молекул і атомів та отримання короткохвильового видимого випромінювання.

Таким чином, основним фактором, що визначає щільність і довжину хвилі випромінювання теплових джерел, є температура.

ТР виготовляється з вольфрамового дроту. Вольфрам характеризується високою температурою плавлення – близько $3\,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($3\,600\text{ K}$), не змінює форму при високій робочій температурі, стійкий до механічних навантажень, пластичний в гарячому стані, що дає змогу отримати з нього нитки дуже малого діаметра шляхом протягування дроту через калібрований отвір. Нитка розжарювання розжарюється до температури $2\,500\text{--}2\,800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для забезпечення сталої роботи розпечену вольфрамову нитку розжарювання необхідно ізолювати від кисню, що міститься у повітрі. Для цього в колбі створюється вакуум (такі лампи називаються вакуумні) або вона заповнюється інертним газом (аргон, криптон, ксенон із різним вмістом азоту або галогенні з додаванням до наповнювального газу певної частки галогенів, наприклад йоду) – газоповні лампи.

Переваги та недоліки ламп розжарювання

Переваги:

- зручні під час експлуатації;
- безпосередньо вмикаються в мережу, не потребують додаткових пристроїв для ввімкнення в мережу;
- низька інерційність у разі ввімкнення;
- легко виготовляти;
- невисока вартість;
- великий вибір за конструктивними особливостями;
- стабільність світлового потоку протягом терміну дії.

Недоліки:

- низька світлова віддача ($7\text{--}20\text{ лм/Вт}$);
- порівняно невеликий термін дії (до $2,5$ тис. год.);
- неекономні (понад 90% електроенергії витрачається на нагрівання тіла розжарювання і виділяється у вигляді тепла).

Основні характеристики ламп розжарювання

Основними характеристиками освітлювальних ЛР є електричні, світлотехнічні і експлуатаційні.

Електричні: номінальна потужність, напруга.

Світлотехнічні: світловий потік, спектральний склад випромінювання.

Експлуатаційні: світлова віддача, термін дії, геометричні розміри.

Потужність ламп залежить від напруги і геометричних розмірів вольфрамової спіралі.

Світловий потік лампи при заданій потужності залежить тільки від температури ТР. За однієї і тієї самої електричної потужності вакуумні лампи створюють менший світловий потік, ніж газонаповнені, спіральні – менше ніж біспіральні, так як температура розжарювання у них різна.

Спектр випромінювання ЛР суцільний, що забезпечує ідеальну передачу кольору. Максимум випромінювання доводиться на інфрачервоні довжини хвиль. Запалювання відбувається миттєво.

На цоколі або на колбі лампи вказано номінальну напругу і номінальну потужність. В освітлювальних мережах застосовують лампи з напругою 127 і 220 В, а для місцевого освітлення – 12 В, 36 В. Лампа при її ввімкненні на номінальну напругу повинна випромінювати нормований світловий потік.

Найважливіші властивості ЛР – світлова віддача й термін дії – визначаються температурою спіралі. При підвищенні температури спіралі зростає яскравість, але одночасно зменшується і термін дії (рис. 1.3). Скорочення терміну дії є наслідком того, що випаровування матеріалу (вольфраму), з якого виготовлена нитка, при високих температурах відбувається швидше, унаслідок чого колба темніє, а нитка розжарювання стає все тоншою і тоншою і в певний момент розплавляється, після чого лампа виходить з ладу.

Термін дії ламп залежить від стійкості ТР. Головним фактором, що впливає на характеристики ЛР під час їхньої експлуатації, є напруга. Відхилення напруги живлення від номінального значення істотно впливає на характеристики ЛР.

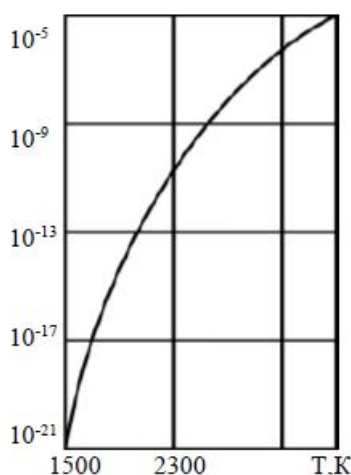


Рисунок 1.3 – Залежність швидкості випаровування вольфраму у вакуумі від температури нагрівання дроту, $\text{м}^2/\text{с}$

Зі збільшенням напруги на лампі різко збільшуються сила струму, потужність, світловий потік і світлова віддача, але зменшується середній термін дії. Збільшення світлової віддачі внаслідок збільшення температури обмежене різким зменшенням терміну дії ТР.

Як змінюється світловий потік, світлова віддача і термін дії лампи від величини напруги, що до неї підводиться, зрозуміло з таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Змінювання основних параметрів ламп розжарювання в залежності від напруги, що підводиться

Напруга, що підводиться, у відсотках від номінального значення	Світловий потік, у відсотках від номінального значення	Світлова віддача, у відсотках від номінального значення	Термін дії, у відсотках від номінального значення
90	70	80	390
95	84	90	160
98	93	95	105
100	100	100	100
103	111	105	80
105	119	110	60
110	137	125	40

Як впливає з таблиці, при зниженні напруги в мережі світлова віддача і світловий потік значно зменшуються, тоді як термін дії збільшується. Під час збільшення напруги в мережі світлова віддача зростає, а термін дії різко знижується. Зниження напруги в лампі порівняно з номінальним призводить до того, що спектр випромінювання змінюється. При цьому освітлювані предмети здаються пофарбованими в інші кольори. Наприклад, предмети жовтого кольору здаються білими, темно-синього – чорними тощо. Це явище спостерігається частіше при малопотужних лампах.

Варто також зазначити, що питомий опір вольфраму, як і всіх чистих металів, зростає з температурою і при температурах 1 400–1 800 °С відрізняється від значень при кімнатній температурі в 12–20 разів. Це спричиняє різкі перепади струму при ввімкненні, який перевищує сталі значення в 12–20 разів. Саме через ці перепади струму вихід ламп з ладу майже завжди настає в момент увімкнення.

1.3 Сучасні типи ламп розжарювання

У зв'язку з необхідністю економити електроенергію і зменшенням викиду вуглекислого газу в атмосферу в багатьох країнах введена або планується до

введення заборона на виробництво, закупівлю й імпорт ЛР з метою змусити замінювати їх на енергозберігаючі (компактні люмінесцентні, світлодіодні, індукційні тощо) лампи.

1 вересня 2009 року в Євросоюзі відповідно до Директиви 2005/32/EG набула чинності поетапна заборона на виробництво, закупівлю магазинами та імпорт ЛР (за винятком спеціальних ламп). З 2009 року заборонено використання ламп потужністю 100 Вт і більше, ламп з матовою колбою 75 Вт і більше (з 1 вересня 2010) тощо.

Застосовують лампи вакуумні (НВ), газонаповнені біспіральні (НБ), біспіральні криптонові (НБК), дзеркальні з дифузним шаром, місцевого освітлення тощо. У маркуванні ЛР вказуються літери, які позначають тип лампи. Після букв зазначається діапазон робочих напруг і номінальна потужність.

ЛР із дзеркальним шаром (дзеркальні лампи) відрізняються від звичайних ЛР формою і конструкцією колби. У цих лампах поверхня колби поблизу цоколя покрита дзеркальним шаром зі срібла або алюмінію, а нижня частина колби матова. Дзеркальне покриття слугує хорошим відбивачем, і завдяки частині колби, що відбиває, світловий потік, який випромінюється лампою, може спрямовуватися по осі лампи у вигляді вузького (концентрованого) або широкого пучка. Отже, дзеркальна лампа становить і джерело світла, і освітлювальний прилад одночасно. У разі використання дзеркальних ламп без освітлювальної арматури потрібно захищати скляну колбу лампи від механічних пошкоджень.

Лампи розжарювання загального призначення

Наведемо базові класи ЛР загального призначення.

Напруга ламп цього класу становить 127 і 220 В. Вони поділяються на вакуумні (позначаються літерою В), спіральні з аргонним наповненням (Г), біспіральні (Б) з нормальною світловою віддачею і лампи з підвищеною світловою віддачею та криптоновим наповненням (БК).

Потужність ламп типу В становить 15 і 25 Вт, їх світлова віддача 7,5–10,5 лм/Вт.

Потужність ламп типу Г – 150–1500 Вт; типу Б – 40–200 Вт; типу БК – 40–100 Вт. Усі лампи зазначених типів характеризуються світловою віддачею 9,5–17 лм/Вт.

Вони відрізняються формою колби, ТР і цоколем.

Лампи розжарювання спеціального призначення

Лампи спеціального призначення поділяються на такі групи:

- транспортні лампи (трамвайні – Т, автомобільні – А, залізничні – Ж, ЖС, СЖ, судові – С, літакові – СМ);
- лампи для оптичних систем (кінопроекційні – К, прожекторні – ПЖ, дзеркальні – ЗК, лампи-фари – АФ і СМФ);
- світловимірювальні лампи (СВС і СВП);
- галогенні лампи розжарювання (далі –ГЛР).

Галогенові лампи розжарювання

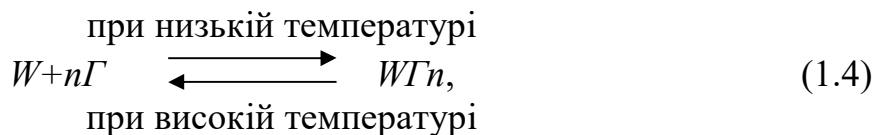
За структурою і принципом дії галогенні лампи можна порівняти з ЛР, але вони містять в газі-наповнювачі незначні домішки галогенів (бром, хлор, фтор, йод) або їх з'єднання. За допомогою цих добавок у певному температурному інтервалі можна практично повністю усунути потемніння колби (спричинене випаровуванням атомів вольфраму нитки напруження), тому розмір колби в галогенних ЛР може бути значно меншим.

У вакуумних лампах вольфрам безперешкодно випаровується з ТР і осідає на внутрішніх стінках колби, що призводить до різкого зниження світлового потоку. Одним із шляхів протидії швидкому випаровуванню вольфраму є наповнення ламп інертним газом. Однак цей спосіб не усуває його осідання на колбі, а лише зменшує швидкість.

З метою повного очищення колби лампи від осідаючих часток вольфраму до інертного газу додають галогени (йод, хлор, бром, фтор та їх сполуки). Завдяки цим домішкам у лампі за певних умов виникає ланцюг реакцій, який називається галогенним циклом. Ці реакції приводять до повного очищення колби від осідаючого вольфраму, який повертається назад на ТР.

ГЛР є тепловими джерелами світла, у їхніх колбах створено умови для перебігу реакцій вольфрамо-галогенного циклу (далі – ВГЦ). ВГЦ – це комплекс реакцій, унаслідок яких частки вольфраму, що випарилися з поверхні нагрітого до високих температур ТР, переміщуються за допомогою галогенів у зворотному напрямі – з області більш низьких в область більш високих температур. Призначення цих циклів – запобігати почорнінню колби від часток вольфраму, який випаровується з ТР, зберігати її прозорою протягом усього терміну дії ламп. Унаслідок цього зростає корисний термін дії лампи. На жаль, ВГЦ, який повертає вольфрам на ТР, не здатний «регенерувати» його, бо частки вольфраму випаровуються з одних ділянок ТР (більш гарячих) і осідають на інших (більш холодних).

ВГЦ відбувається за однаковою схемою (1.4). Спрощену схему ВГЦ подано на рисунку 1.4.



де G – галоген;

n – кількість атомів.

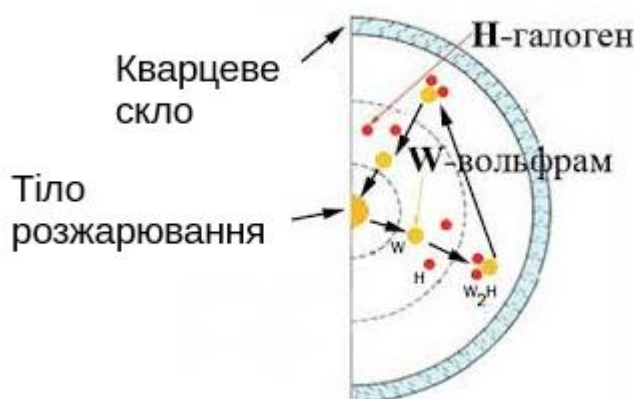


Рисунок 1.4 – Схема перебігу ВГЦ

При низькій температурі (300–1 200 °С) галоген з'єднується на стінках колби з частками вольфраму і утворює хімічну сполуку – галогенід вольфраму. При певних температурах це газоподібне сполучення дифундує від стінок колби (де його концентрація підвищена) у напрямі ТР. Тут галогеніди дисоціюють на вольфрам, що осідає на ТР, і галоген, який у вільному стані рухається до стінки колби для з'єднання з новою порцією вольфраму.

Перебіг ВГЦ посилюється в разі переходу від йоду до бром, потім до хлору і фтору. До того ж відповідно підвищується температура дисоціації галогенідів. Тільки при фторному циклі галогеніди розпадаються на самому ТР, а при використанні інших речовин (йоду, бром, хлору) цей розпад розпочинається при більш низьких температурах (нижче температури ТР), і вольфрам при цьому осідає не на ТР, а на прилеглі області [3].

Для сталого ВГЦ дуже важлива оптимальна концентрація галогену. А вона повинна бути достатньою, щоб цикл не припинився, і не дуже високою, щоб не зруйнувалися металеві деталі лампи.

Як галогенні домішки застосовується йод, бром, хлор, фтор. У сучасних ГЛР зазвичай застосовують не чисті галогени, а їхні сполуки, наприклад бромистий метил CH_2Br_2 і бромистий метилен CH_3Br . Робота щодо підбору нових летких хімічних сполук галогенів триває.

Для наповнення ГЛР використовуються криптон, ксенон – до тиску вище 10^5 Па у холодному стані, тобто, в робочому стані при високих температурах ТР тиск інертного газу значно вищий за атмосферний, що спричиняє збільшення терміну дії ГЛР до 3 000 год.

Оскільки для сталого перебігу ВГЦ необхідні високі температури, колба ЛР виготовляється з тяжкотопкого кварцового скла з температурою плавлення 1 986 К, що уможливорює зменшення габаритних розмірів ГЛР.

Галогенні лампи порівняно зі звичайними ЛР характеризуються більш стабільним світловим потоком, значно меншими розмірами, більш високою термостійкістю і механічною міцністю внаслідок застосування в них кварцевої колби.

Застосування кварцового скла та зменшення розпилювання вольфрамового ТР уможливили підвищення його температури і, як наслідок, збільшення світлової віддачі лампи, яка сягає 40 лм/Вт. Вони також відрізняються підвищеною яскравістю, більшим терміном дії, малими габаритними розмірами й постійністю характеристик у процесі роботи.

За сферами застосування сучасні ГРЛ можна розподілити на такі типи:

- для інфрачервоного опромінювання;
- для прожекторів і світильників зовнішнього освітлення;
- для фотознімального і телевізійного освітлення;
- для автофар;
- для аеродромних вогнів;
- для оптичних приладів.

За конструктивними ознаками ГЛР поділяються на лінійні (або трубчасті) і лампи з компактним ТР.

До лінійних належать лампи, у яких відношення довжини до діаметра більше 10, із ТР у формі довгої спіралі. Відповідно колби цих ламп мають форму вузьких трубок. Такі лампи зазвичай з обох боків колби обладнані струмоводами.

У ламп другого типу співвідношення довжини до діаметра менше або дорівнює 8. Колби, відповідно, мають форму короткого циліндра або подібні до нього. Лампи з компактними ТР поділяються на малогабаритні і потужні в колбах з довжиною, яка приблизно дорівнює діаметру. В малогабаритних лампах обидва виводи здебільшого виведені в один бік.

Малі габарити ГЛР уможливають їх застосування у малогабаритних світлових приладах. Однак потрібно зважати на те, що ці лампи працюють у напруженому тепловому режимі і може спостерігатися перегрівання як лампи, так і приладу. Отже, особливу увагу необхідно приділяти тепловому режиму приладу з ГЛР.

Висока температура на колбах компактних ГЛР унеможливає використання звичних різьбових цоколів. Лінійні лампи обладнані спеціальними торцевими цоколями, що витримують великі температури. У малогабаритних лампах як цоколь використовується сама колба з жорстко фіксованими виводами із вольфрамового дроту.

Сучасні ГЛР випускають із потужністю 5–20 000 Вт і напругою 6,3–220 В.



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд деяких типів галогенових ЛР

Галогенні лампи мають певні недоліки:

1. Колби галогенних ламп здатні сильно нагріватися (до 500 °С), тому при установці ламп потрібно неухильно дотримуватися норм протипожежної безпеки. Доторкання до ввімкненої або недостатньо остиглої лампи може призвести до серйозних опіків. Та й остиглу лампу не варто брати голими руками. Від цього на колбі лампи залишаються жирні плями, після ввімкнення жир під дією високої температури обвуглюється, чорні частки вугілля поглинають тепло і сильно розжарюються. Через місцеве перегрівання колба може лопнути, а лампа вибухнути. Лампу варто брати, використовуючи чисті тканинні рукавички, шматок чистої тканини або паперову серветку. Якщо колба чимось забруднена, її потрібно протерти спиртом. Об'єкти, освітлювані

IRC-галогенними лампами з відбивачем (напівпрозоре дзеркало), менше нагріваються. Остигли лампи з відбивачем можна брати руками.

2. Лампи чутливі до стрибків напруги у мережі живлення і за несприятливих умов можуть швидко вийти з ладу, тому їх бажано вмикати через стабілізатор напруги. Для досягнення найбільшої ефективності лампи її доцільно використовувати на повну потужність, заявлену виробником. Однак її яскравість можна регулювати за допомогою стандартних світлорегуляторів. Знижуючи потужність лампи, можна знизити або навіть відімкнути роботу галогенного циклу, і вона почне працювати як звичайна ЛР. Для відновлення роботи галогенів і зняття металевих часток вольфраму, що осіли на стінках колби, достатньо на кілька хвилин увімкнути лампу на повну потужність.

3. У спектрі випромінювання лампи наявний надлишок ультрафіолету, що шкідливий для здоров'я, тому, її не рекомендується використовувати без спеціальних фільтрів.

Контрольні питання до розділу 1

1. Що називається джерелом світла?
2. Класифікація джерел світла.
3. Якими параметрами характеризуються джерела світла і як їх оцінити?
4. Охарактеризуйте конструкцію ламп розжарювання.
5. Залежність параметрів ЛР від напруги мережі.
6. Типи ламп розжарювання загального призначення. Їх характеристика.
7. Вольфрамо-галогенний цикл. Умови його перебігу.
8. Які типи галогенів використовуються в ГЛР і як вони впливають на характеристики ламп?
9. Поясніть причини збільшення терміну дії і світлової віддачі ГЛР.
10. Конструкція ГЛР.
11. Порівняйте характеристики ГЛР і звичайних ЛР.

2 РОЗРЯДНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

Низька економічність ЛР стала причиною появи більш економічних джерел світла, що базуються на електричному розряді в газах і парах металів [2].

Розрядна лампа (далі – РЛ) – це таке джерело світла, у якому оптичне випромінювання виникає внаслідок електричного розряду в газах, парах або їх сумішах.

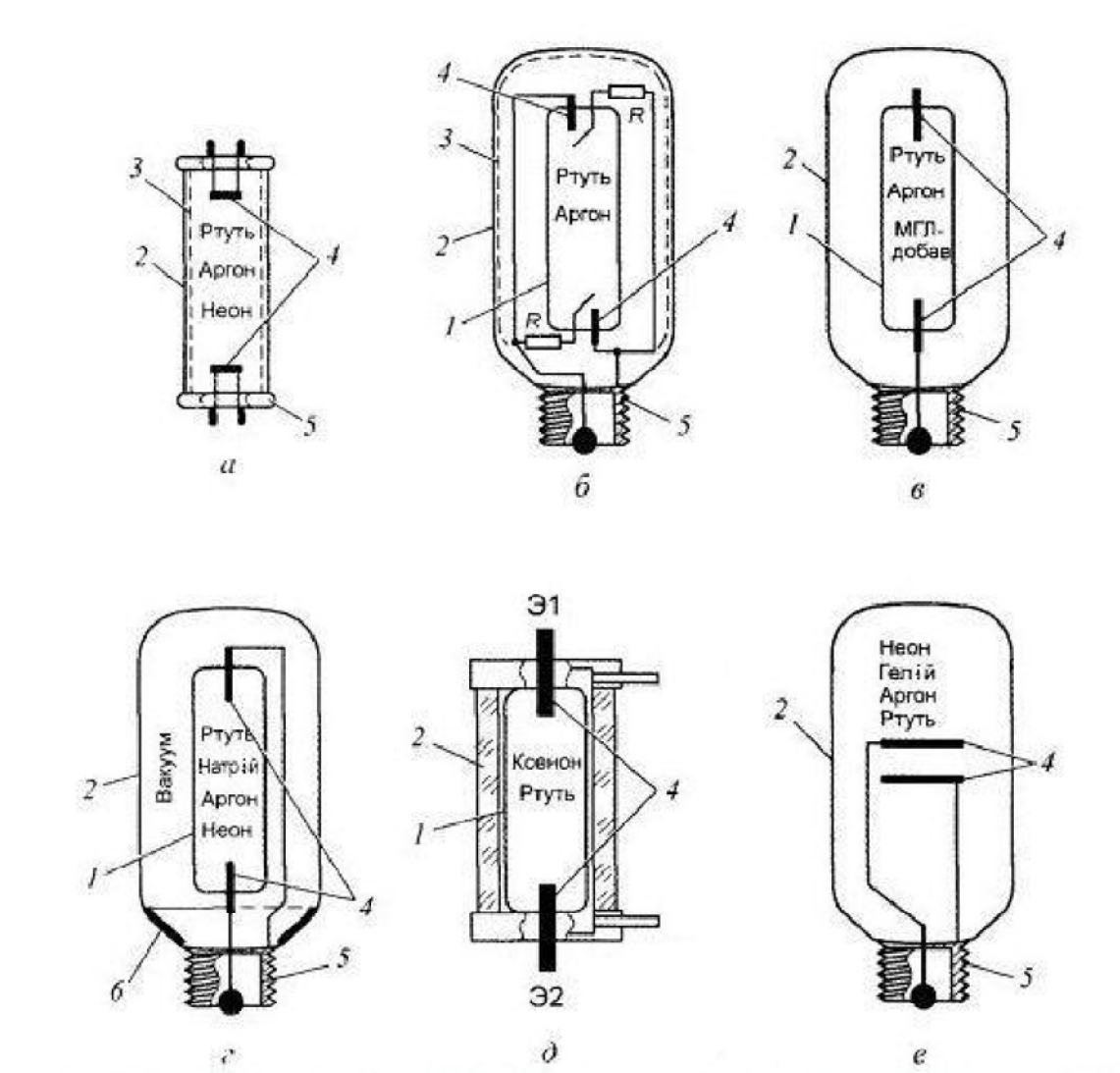


Рисунок 2.1 – Принципові схеми конструкцій розрядних ламп:

а – ЛЛ; б – ДРЛ; в – ДРИ (МГЛ); г – ДНаТ; д – ДКсТ; е – ТН;

1 – розрядна трубка (пальник) з прозорого кварцевого скла, стійкого до дії високих температур і наповнювачів; 2 – колба прозора; 3 – люмінофор, нанесений на стінки колби; 4 – електроди з тугоплавкого металу (вольфрам, ніобій тощо), активовані; 5 – цоколь (різьбовий Е27 або Е40, штирбовий тощо); 6 – газопоглинач барієвий для підтримання вакууму

Усі РЛ, які використовуються для освітлення, умовно можна розділити на кілька підгруп (конструкцію ламп зображено на рисунку 2.1) [4]:

- ртутні лампи низького тиску (до 1,04 Па) – типу ЛЛ і високого тиску 0,3–0,5 МПа – типу ДРЛ з виправленою кольоровістю (для штучного внутрішнього – ЛЛ і зовнішнього освітлення – ДРЛ);

- металогалогенні – типу ДРІ (для загального освітлення спортивних споруд, виставок, кольорових кінозйомок тощо);

- натрієві низького і високого тиску – типу ДНаТ (для зовнішнього освітлення і великих внутрішніх площ);

- ксенонові – типу ДКсТ (для освітлення великих відкритих просторів, архітектурних споруд і теплиць);

- тліючого світіння – типу ТН і дугового розряду – типу ДНеСГ (для індикації і сигналізації) [5].

Переваги та недоліки газорозрядних ламп

Переваги РЛ:

- висока світловіддача (від 60 до 100 лм/Вт);
- значний термін дії (від 10 до 15 тис. год);
- різний спектр випромінювання: ультрафіолетовий (УФ), видимий, інфрачервоний (ІЧ).

Недоліки:

- складність підімкнення до мережі. Для запалювання необхідна висока напруга. Для постійного горіння в ланцюг кожної лампи вмикається баласт, що обмежує струм розряду;

- залежність характеристик від теплового режиму, оскільки температура визначає тиск парів робочої речовини. Сталий режим устанавлюється через певний проміжок часу після ввімкнення;

- пульсація світлового потоку.

2.1 Особливості ртутного розряду низького тиску

Проходження електричного струму через газ

Електричний струм у газах порівняно зі струмом у металевих провідниках має певні особливості [6, 7]:

– носіями електричних зарядів у газі є елементарні заряджені частинки – електрони та іони. Електричний струм у газах – це спрямований рух, як електронів, так і іонів під дією прикладеного градієнта потенціалу;

– атоми і молекули в газі перебувають на значній відстані один від одного, що у багато разів перевищує розміри молекули, унаслідок чого сили взаємодії між ними незначні, і вільні заряди практично відсутні. Щоб газ став провідником, його необхідно іонізувати, тобто створити в ньому іони й вільні електрони.

У таблиці 2.1 наведено енергетичні параметри атомів металів та газів [7].

Таблиця 2.1 – Енергетичні параметри атомів металів та газів

Метал або газ	Потенціал іонізації, В	Потенціал збудження, В	Довжина хвилі, нм
Na	13,54	10,15	121,60
Li	5,39	1,85	670,79; 670,78
Na	5,14	2,09	589,59; 588,99
K	4,34	1,61; 1,62	769,90; 764,49
Zn	9,35	4,03; 5,81	307,59; 213,86
Rb	4,18	1,56; 1,59	794,76; 780,03
Sr	5,61	1,80; 2,69	689,26; 460,73
Cd	8,95	3,80; 5,31	326,10; 228,80
Cs	3,89	1,39–1,45	894,35; 852,11
Hg	10,39	4,89	253,65; 535,05
He	24,47	20,86; 21,20	59,16; 58,44
Ne	21,56	16,52; 16,55	74,3; 73,6
Ar	15,76	11,50; 11,70	106,7; 104,8
Kr	14,0	9,91; 10,62	123,6; 116,5
Xe	12,13	8,45; 9,56	146,9; 129,5

У теорії газового розряду процес початкової іонізації в газовому проміжку під дією прикладеної напруги називають **пробоєм газового проміжку**. Проходження електричного струму через газ називають **розрядом**.

До того ж напруга пробою відстані між електродами залежить від різновиду газу і його тиску. При змінній напрузі явище пробою ускладнюється побічними процесами. Наприклад, зі збільшенням частоти напруга пробою знижується.

Фізичні процеси, що відбуваються в момент пробою, можна описати так. У певному обсязі газу внаслідок впливу зовнішніх природних іонізуючих факторів в невеликій кількості завжди присутні окремі вільно заряджені частинки, які в разі появи електричного поля починають рухатися вздовж силових ліній. Швидкість руху заряджених частинок у газі залежить від їхнього заряду й маси, а також напруженості поля. Якщо частинка зустріне на шляху атом або молекулу газу, то відбудеться зіткнення. Залежно від кінетичної енергії, яку має частинка на момент зіткнення, і властивостей зустрічного атома зміниться швидкість атома (пружне зіткнення) або настане його збудження чи іонізація (непружне зіткнення). При збудженні внутрішня енергія атома збільшується внаслідок збільшення кінетичної енергії частинки. Цей надлишок енергії звільняється через невеликий проміжок часу у вигляді фотона. При іонізації електрон звільняється із зовнішньої орбіти атома або молекули. Звільнений електрон під дією поля починає рухатися і, зі свого боку, може іонізувати зустрічні атоми чи молекули. Процес звільнення заряджених частинок при достатній напруженості прикладеного поля відбувається лавиноподібно. Зовнішній ланцюг, за допомогою якого була прикладена напруга, що спричинила пробій, виявиться замкнутим, та в ньому встановиться електричний струм, значення якого визначається, насамперед, параметрами цього зовнішнього ланцюга.

Після зникнення електричного поля вільні електрони захоплюються позитивними найближчими іонами, а останні перетворюються на нейтральні молекули або атоми. Цей процес називають **рекомбінацією**. Відбудеться деіонізація газу, що повертає його до початкового стану.

На рисунку 2.2 наведено елементарні процеси при проходженні електричного струму крізь газ.

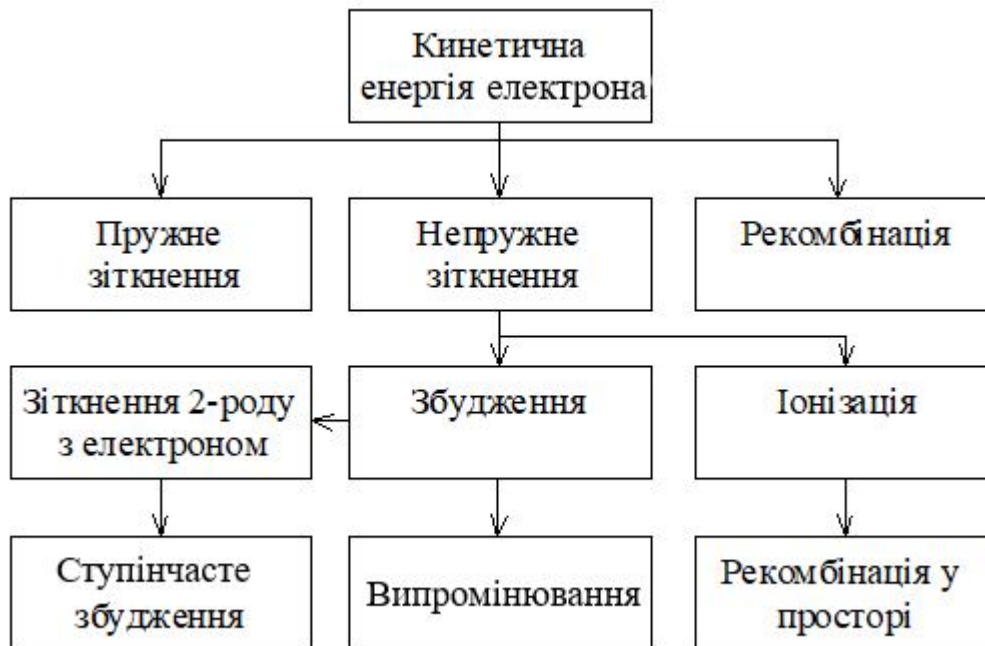


Рисунок 2.2 – Елементарні процеси під час проходження електричного струму через газ

Фізичні явища в газовій плазмі

Електричний струм через газ обумовлений переміщенням двох типів носіїв зарядів – легких електронів, що рухаються у напрямі до анода і тих, що несуть одиничний негативний заряд, і значно важчих частинок – іонів, що рухаються у напрямі до катода. Електрони й іони в процесі руху до катода й анода зіштовхуються між собою і нейтральними атомами та молекулами [7].

Рух електронів та іонів унаслідок зіткнення є хаотичним як за напрямками, так і за швидкостями. Можна стверджувати, що в газовому провіднику окрім базового газу, що складається з атомів і молекул, міститься також електронний і іонний газ. Середня швидкість руху електронів за аналогією може характеризуватися температурою електронного газу T_e , як і середня швидкість атомів або молекул газу, що визначається його тепловим станом, характеризується його температурою.

Таким чином, при проходженні усталеного електричного струму крізь газ газовий проміжок виявляється заповнений речовиною, що перебуває в особливому стані, який характеризується високою концентрацією іонізованих частинок (10^4 – 10^2) концентрації нейтральних атомів. Такий стан речовини називають **плазмою**.

При низьких тисках газу або пару внаслідок значної довжини вільного пробігу електронів і великої різниці в масах між електронами та атомами або молекулами газу температура електронного газу може бути значною, незважаючи на низьку температуру базового газу (неізотермічний стан плазми). Зі збільшенням тиску базового газу або струму зростає й кількість зіткнень, а отже, й інтенсивність передачі енергії від електронів до базового газу. Температура газу збільшиться, а температура електронного газу зменшиться, і вони поступово наблизяться один до одного. При тиску, близькому або рівному до атмосферного, а також струмі в декілька ампер, температури електронного й базового газу стають практично однаковими.

На рисунку 2.3 подано залежність температур базового та електронного газів від тиску газу.

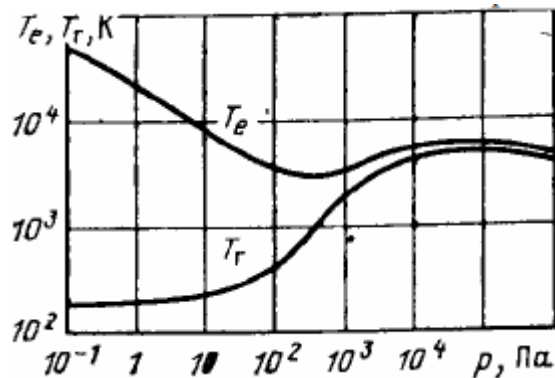


Рисунок 2.3 – Температура електронного газу (T_e) і середовища газу (T_g), залежно від тиску газу (p)

За наявності цих умов утворюється **ізотермічна плазма**, що становить суміш базового і електронного газів, які характеризуються майже однаковими температурами і вирізняються значною концентрацією збуджених атомів і, відповідно, характеризуються зіткненнями другого виду. Ізотермічна плазма утворюється при струмі в декілька ампер і тиску 10^5 Па та вище. Температура ізотермічної плазми досягає 4 000–5 000 К.

Процеси на аноді та катоді

Щоб в ланцюзі, який містить газовий проміжок, виник сталий електричний струм, необхідно щоб електрони перейшли з катода в газ і з газу в анод. Вихід електронів із металевого провідника або напівпровідника в газ потребує витрати енергії на подолання потенційного бар'єра, наявного на кордоні провідник – газ. Значення потенційного бар'єру залежить від матеріалу

катода і різновиду газу. Отже, для забезпечення сталості струму напруга, прикладена до газового проміжку, має бути достатньою не тільки для пробую газу й утворення в ньому лавиноподібного зростання носіїв зарядів, але й для того, щоб створити поблизу катода достатню напруженість електричного поля для подолання потенційного бар'єра при цих матеріалах катода й газу. Із нагріванням катода вихід електронів під дією високої напруженості поля, що називається електростатичною (автоелектронною) емісією, спрощується внаслідок виникнення термоелектронної емісії, обумовленої з високою температурою катода. Температура термоелектронної емісії, що забезпечує вихід електрона, необхідний для підтримання електричного струму в газовому проміжку, залежить від матеріалу катода. Вона досить висока для катодів з чистих металів (понад 2 270 К) і істотно знижується при застосуванні плівкових та особливо складних, так званих оксидних катодів (близько 1 300 К).

Наявність електростатичної або термоелектронної емісії катода призводить до того, що прикатодна область за своїм складом відрізняється від плазми, характерної для базового газового проміжку [7].

У газовому проміжку в прикатодній області можна розрізнити такі характерні області (рис. 2.4): астоново-темний простір (1); зону прикатодного свічіння (2), яка займає тим більшу частину поверхні катода, чим більший струм розряду; катодний темний простір (3) – невеликий темний проміжок, що відокремлює катодне свічіння від негативного тліючого свічіння (4), яке має вигляд хмарки, чітко обмеженої з боку темного простору, із розмитою межею у бік анода; фарадеєво-темний простір (5) і стовп розряду (6), заповнений плазмою. Падіння напруги, пов'язане із входженням електронів в анод, створює безпосередньо близько від нього анодно-темний простір (7) – вузьку темну область, за якою за певних умов виникає тонка плівка анодного свічіння.

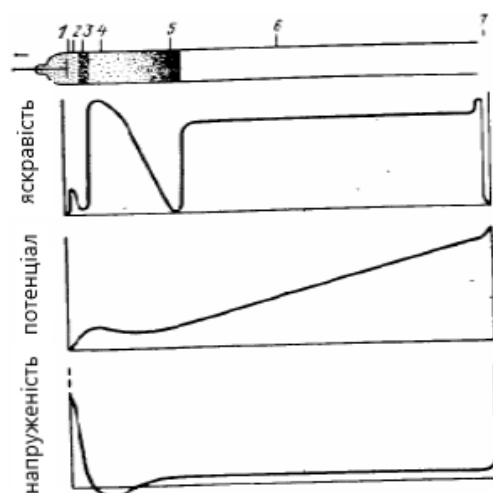


Рисунок 2.4 – Характерні області в газовому проміжку при тліючому розряді

На рисунку 2.4 наведено розподіл яскравості, електричного потенціалу й напруженості електричного поля, що відповідають зазначеним характерним областям розряду. Ці видимі особливості білякатодного й біляанодного простору спостерігаються в разі вільного, необмеженого розряду при низькому тиску газу або пари. Зі збільшенням тиску або появою в газорозрядному просторі будь-яких перешкод для руху електронів та іонів картина спотворюється, окремі області настільки зменшуються, що відокремити їх неможливо.

Розміри білякатодної області за подібних умов обернено пропорційні тиску газу.

Удари позитивних іонів об катод і електронне бомбардування анода призводять до розпорошення їх поверхонь. У газорозрядних лампах це спричиняє зменшення терміну дії внаслідок руйнування катода.

Види розрядів

Таким чином, якщо запаяну з обох боків скляну трубку наповнити інертним газом або невеликою кількістю металу з високою пружністю парів, наприклад ртуттю, і по кінцях трубки розташувати електроди, приклавши до них різницю потенціалів, то електричне поле, що виникає між електродами, почне впливати на вільні електрони й іони, завжди наявні в газі. Унаслідок цього впливу електрони переміщуються до анода, а іони – до катода, тобто виникає електричний струм.

Зі збільшенням напруги на електродах швидкість переміщення частинок збільшується, електрони набувають достатньої кінетичної енергії для іонізації атомів газу, що зустрічаються на їхньому шляху. Унаслідок іонізації з'являються нові електрони й іони, тому сила струму в трубці збільшується.

Через відносно малу швидкість перенесення іони групуються біля катода, утворюючи об'ємний позитивний заряд, тоді як більш рухливі електрони швидко переносяться до анода. Як наслідок, уздовж трубки виникає нерівномірний розподіл потенціалу. Це призводить до того, що іони отримують значне пришвидшення і ударом об катод звільняють з його поверхні нові електрони, які, зі свого боку, стають джерелами іонізації. Таким чином, виникає процес, що не залежить від зовнішніх іонізаторів та супроводжується свіченням.

Під дією напруги, що є достатньою для пробою, в газі можна виявити такі види розряду:

1. При невеликій щільності струму виникає **темний розряд**, що характеризується відсутністю видимого свічення.

2. Зі збільшенням щільності струму при деякому її значенні для певного газорозрядного проміжку відбувається запалювання розряду, тобто з'являється свічіння, і напруга на газорозрядному проміжку помітно зменшується.

3. При подальшому зростанні щільності струму напруга залишається незмінною до тих пір, поки вся поверхня катода не вкриється свічінням; цій ділянці вольт-амперної характеристики відповідає так званий **нормальний тліючий розряд**.

4. Подальше збільшення щільності струму супроводжується підвищенням напруги розрядного проміжку, розряд переходить в **аномальний тліючий**, що характеризується інтенсивним свічінням на катоді, його температура збільшується відповідно до щільності струму.

5. Після досягнення катодом температури термоелектронної емісії, яка залежить від матеріалу катода, відбувається перехід тліючого розряду в **дуговий**, що супроводжується збільшенням інтенсивності свічіння стовпа розряду й навколокатодних і навколоанодних ділянок. До того ж напруга на газорозрядному проміжку різко падає і продовжує падати зі збільшенням щільності струму, розряд має спадку вольт-амперну характеристику.

Тліючий розряд спостерігається при малих щільностях струму (10^{-5} – 10^{-1} А/см²) і низькому тиску газу. Напругу, яку необхідно прикласти до лампи для виникнення тліючого розряду, прийнято називати **напругою запалювання**.

Із подальшим збільшенням струму в ланцюзі лампи процес бомбардування катода іонами посилюється, при цьому катод загострюється і виникає термоелектронна емісія. Щоб з'явився дуговий розряд, необхідно прикласти до трубки підвищену напругу.

Вольт-амперна характеристика дугового розряду в газах наведена на рисунку 2.5.

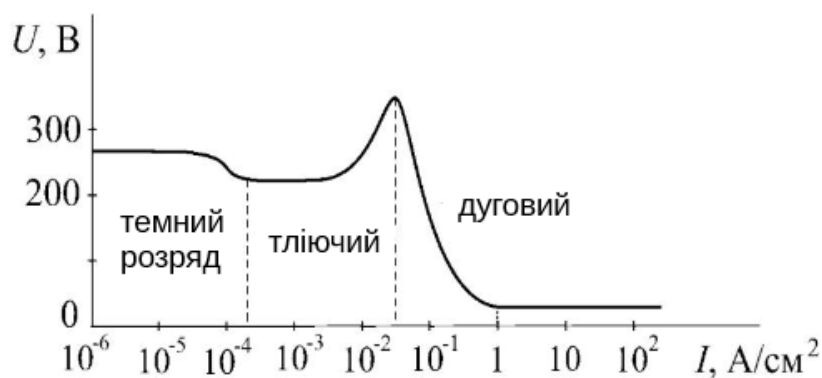


Рисунок 2.5 – Вольт-амперна характеристика розряду в газах

Випромінювання та енергія розряду

Головним джерелом випромінювання є стовп розряду. Збуджені електрони під час переходу на нижчий рівень збудження випромінюють квант світлової енергії – **фотон**. Оптичне випромінювання газового розряду, спричинене переходом збуджених атомів в нормальний та проміжний енергетичні стани, характеризується лінійчатим спектром, таке випромінювання називають **резонансним** [7].

Окрім випромінювання атомів, у газовому розряді наявне випромінювання молекул, що є складнішим та утворює суцільний або смугастий спектр. У процесі встановлення газового розряду одночасно з процесами іонізації та збудження відбуваються процеси рекомбінації, які також можуть супроводжуватися випромінюванням з широким спектром. Такі випромінювання називають **нерезонансними**.

Енергія, що підводиться до стовпа газового розряду, використовується на нагрівання стінок колби, що містить газ, нагрівання самого газу в межах стовпа та на випромінювання стовпа (рис. 2.6):

1) при тиску нижче 0,1 Па потужність, що підводиться до стовпа розряду, здебільшого витрачається на резонансне випромінювання та нагрівання стінок колби, до того ж витрати на нагрівання колби зменшуються зі збільшенням тиску;

2) при тиску від 1 до 10^4 Па продовжує зменшуватися частка енергії, що витрачається на нагрівання стінок колби, помітно зменшується частка резонансного та дещо зменшується частка нерезонансного випромінювань, до того ж значно збільшується частка енергії, що витрачається на нагрівання газу: у цьому інтервалі тиску газовий розряд малоефективний;

3) область тиску від 10^4 Па та вище залишається малоефективною щодо випромінювання, але при більшій щільності струму головна частина енергії витрачається на створення нерезонансного випромінювання. Резонансне випромінювання відіграє незначну роль, а частка енергії, що витрачається на нагрівання газу, різко зменшується.

Потужність, що витрачається на аноді та катоді та некорисна з погляду створення випромінювання, буде тим меншою, чим менші відповідні падіння напруги. З цього виникає, що використовувати тліючий розряд, обумовлений значним падінням напруги на катоді, доцільно лише в разі великої довжини розрядної трубки. У разі можливого переходу до самостійного дугового розряду необхідно обрати саме його. У разі великої щільності струму, використання якої доцільне при високому тиску, для економного застосування джерела світла бажано обрати тільки дуговий розряд.

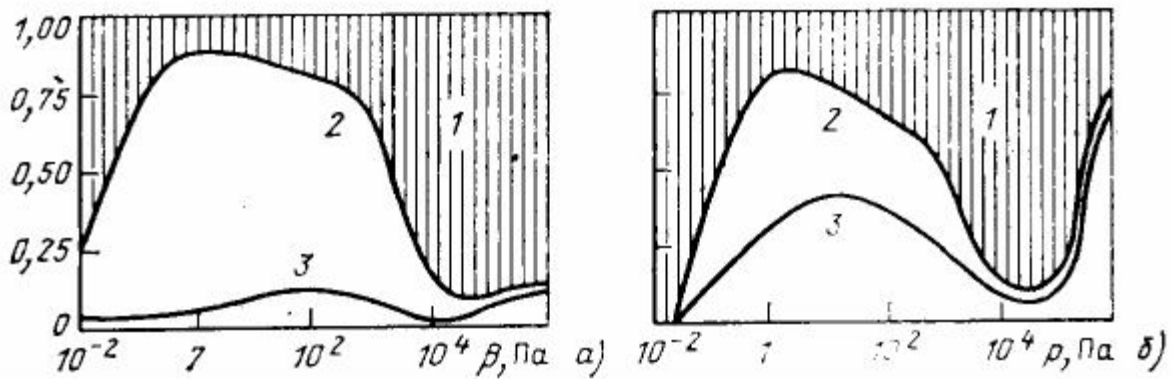


Рисунок 2.6 – Залежність балансу енергії в стовпі розряду від тиску при малих (а) та великих (б) щільностях струму:
 1 – теплові втрати; 2 – резонансне випромінювання;
 3 – нерезонансне випромінювання

Проходження змінного струму через газ

Процес деіонізації розрядного проміжку, який настає після зняття прикладеної напруги, триває недовго. Тривалість створення необхідної для проходження струму концентрації носіїв зарядів після запалювання розряду теж набагато менше тривалості напівперіоду змінного струму промислової частоти 50 Гц. Під час ввімкнення газового розряду на змінну напругу обмеження струму можливе, як і при постійному струмі, лише при використанні баластного опору.

Мала інерційність процесів виникнення і зникнення носіїв зарядів призводить до того, що при проходженні змінного струму промислової частоти через газ зміщення фаз між миттєвими значеннями струму і напруги на газовому проміжку не спостерігається. Зміщення по фазі між струмом і напругою визначається в ланцюзі з газорозрядним провідником за особливостями використаного для обмеження струму баластного опору.

Оскільки випромінювання, що виникає під час проходження струму через газ, визначається миттєвими значеннями потужності, що поглинається в газі, то випромінювання на змінному струмі буде пульсувати з частотою, рівною подвійній частоті джерела живлення. У разі освітлення рухомих об'єктів пульсуючим світловим потоком спостерігається явище стробоскопічного ефекту, для мінімізації якого необхідно скорочувати паузи струму, зменшувати глибину модуляції шляхом отримання випромінювання в момент проходження струму через нуль тощо.

Закони люмінесценції

Люмінесценція – випромінювання речовини понад його теплове випромінювання за рахунок енергії, що підводиться. Другою необхідною умовою люмінесценції є тривале свічіння після припинення поглинання енергії. Речовина може люмінесцювати при будь-якій температурі, саме цим люмінесцентне випромінювання відрізняється від теплового [6, 7].

Розрізняють декілька видів люмінесценції:

– електролюмінесценція, або випромінювання люмінофорів під дією прикладеного до них електричного поля (до цього ж виду належить випромінювання газів внаслідок проходження електричного струму);

– фотолюмінесценція, або свічіння речовини під дією оптичного випромінювання, що поглинається. Речовину, яку випромінює світло, у цьому разі називають **люмінофором**.

Існують і інші види люмінесценції, що виникають при збудженні радіохвилями, рентгенівськими променями, прискореними іонами, альфа-частинками тощо, які використовуються в багатьох галузях техніки.

Електролюмінесценція спостерігається в газах і деяких складних речовинах на базі фосфору, цинку, міді та інших елементів. Електролюмінесценція твердих тіл спостерігається в разі впливу на шар речовини постійного або змінного електричного поля. Електролюмінесценція в полі постійного струму виникає на напівпровідниковому переході кристала р-п-типу. Для такого різновиду електролюмінесценції зазвичай не потрібно високої напруги. Цей вид електролюмінесценції використовується в світлодіодах.

Електролюмінесценція твердих речовин під дією змінного поля потребує високої напруги, достатньої для того, щоб емітувати вільні електрони з катода і надати їм пришвидшення для іонізації атомів кристалічної решітки речовини. На цьому принципі базується робота електролюмінесцентних панелей.

Застосовуючи люмінофори, за допомогою перетворення в них невидимого ультрафіолетового випромінювання на видиме можна істотно збільшити вихід видимого випромінювання і, відповідно, світлову віддачу ламп. Таким чином, застосування люмінофорів у газорозрядних лампах є засобом підвищення світлової віддачі й поліпшення спектрального складу випромінювання.

Застосовуючи в газорозрядних лампах люмінофорні покриття, можна змінювати спектр випромінювання в бік більших довжин хвиль – у червону частину спектра. В цьому й полягає одне з головних призначень люмінофорів.

Люмінофори, що застосовуються під час виготовлення джерел світла

Застосування люмінофорів під час виготовлення джерел світла на базі газового розряду забезпечило отримання високоефективних джерел світла зі спектральним складом випромінювання відповідно до вимог передачі кольору.

Люмінофори здебільшого використовуються в джерелах з розрядами в парах ртуті, тому головні промислові люмінофори мають спектр збудження, що відповідає або довжині хвилі резонансного випромінювання ртуті, або найінтенсивнішій лінії нерезонансного ультрафіолетового випромінювання ртуті з довжиною хвилі 365 нм. Після низки досліджень базовими люмінофорами, що застосовуються під час виготовлення джерел світла, стали люмінофори на базі галофосфату кальцію, активовані марганцем і сурмою для люмінесцентних ламп; фосфат-ванадат ітрію, активований європієм для ртутних ламп високого тиску. Для здешевлення люмінофора фосфат-ванадат ітрію іноді змішують з фосфатними люмінофорами, що підсилює випромінювання в оранжево-червоній зоні спектра з максимальною довжиною хвиль близько 590 нм. Застосовують також фторогермандт магнію, активований марганцем, максимум смуги поглинання якого міститься в області 350 нм. Максимум смуги випромінювання відповідає довжині 660 нм, тобто перебуває в червоній частині спектра.

Крім того, розроблені і застосовуються інші люмінофори. Особливо перспективним є застосування люмінофорів з рідкоземельними елементами, що уможливають істотне збільшення, зокрема, світлової віддачі люмінесцентних ламп.

Люмінофори на базі рідкоземельних елементів забезпечують високу світлову віддачу у вузькому діапазоні довжин хвиль. Приміром, люмінофор на базі хлорапатита кальцію і стронцію, активованого європієм в парах ртуті низького тиску, дає випромінювання синього кольору ($\lambda = 450$ нм), на базі алюмінату магнію, активованого церієм і тербієм – зеленого кольору ($\lambda = 540$ нм), на базі оксиду натрію, активованого європієм – червоного кольору ($\lambda = 610$ нм). Застосовуючи суміші зазначених люмінофорів, можна виготовити люмінесцентні лампи з яскраво вираженими максимумами випромінювання в зазначених діапазонах хвиль при загальній високій світловій віддачі. Комбінацію таких люмінофорів називають трьохсмуговим люмінофором.

Унаслідок можливого поєднання різних хімічних елементів люмінофори забезпечують випромінювання практично в будь-якій області видимого спектра. Складність полягає в забезпеченні при цьому високої світлової віддачі. Отже, для кожного типу ламп спеціально підбирають люмінофор і технологію його нанесення.

За допомогою люмінофорів можна виготовити й кольорові лампи. Однак вимоги щодо високої світлової віддачі обумовили випуск тільки зелених люмінесцентних ламп з люмінофором, що складається з силікату цинку, активованого марганцем. Інші кольорові люмінесцентні лампи виготовляють із покриттям зовнішньої поверхні у вигляді фарбувального пігменту.

2.2 Розрядні лампи низького тиску

Конструкція і принцип дії люмінесцентних ламп

Для оптичного випромінювання здебільшого застосовують ртутні лампи низького тиску (далі – РЛНТ).

РЛНТ – це протяжні ЛЛ низького тиску, у яких невидиме УФ-випромінювання ртутного розряду перетворюється люмінофором на видиме.

За видом розряду розрізняють:

- ЛЛ дугового розряду з гарячими електродами та з попереднім підігріванням;
- ЛЛ тліючого розряду з холодними електродами без попереднього підігрівання.

Залежно від способу запалювання виокремлюють ЛЛ стартерного, швидкого або миттєвого запалювання.

Освітлювальні ЛЛ загального призначення зазвичай виготовляють із дуговим розрядом стартерного запалювання у прямій колбі для мереж з напругою 220 В.

Принцип дії базується на перетворенні УФ випромінювання, отриманого при розряді в парах ртуті, на видиме за допомогою люмінофора при тиску до 10 Па [4].

У люмінесцентних лампах перетворення електричної енергії на світлове випромінювання має дві фази. Електричний розряд у парах ртуті, що наповнює колбу люмінесцентної лампи, супроводжується випромінюванням, яке називається електролюмінесценцією. При цьому виникає промениста енергія, що впливає на люмінофор, нанесений на стінки колби лампи, перетворюється на світлове випромінювання (фотолюмінесценція). У сучасній ЛЛ приблизно 63,5 % споживаної енергії перетворюється на променисту енергію УФ частини спектра, 34,5 % енергії перетворюється в теплову і лише 2 % безпосередньо перетворюється на світлову. Унаслідок фотолюмінесценції УФ випромінювання перетвориться на видиме. Із огляду на це вторинне

перетворення на частку видимих випромінювань припадає близько 20–21 % енергії, що підводиться до лампи.

Перші вітчизняні ЛЛ були розроблені в 1938 році колективом співробітників Фізичного інституту АН СРСР і Всесоюзного електротехнічного інституту під керівництвом С. І. Вавілова і В. А. Фабріканта.

ЛЛ низького тиску становить циліндричну скляну колбу (1) (рис. 2.7), на кінцях якої в цоколях (2) вмонтовані вольфрамові біспіральні електроди (4). На внутрішню поверхню по всій довжині нанесено тонкий шар твердої кристалічної порошкоподібної речовини – люмінофору (5). Довжина і діаметр трубки визначається потужністю лампи та напругою, на яку вона розрахована.

Після відкачування повітря до 1–1,5 Па (6×10^{-3} – 1×10^{-2} мм рт. ст.) всередину колби вводиться крапля (20–30 мг) ртуті, яка випаровується під час роботи лампи (6), і невелика кількість чистого газу – аргону, що забезпечує зменшення процесу випаровування вольфрамових електродів і полегшення запалювання лампи.

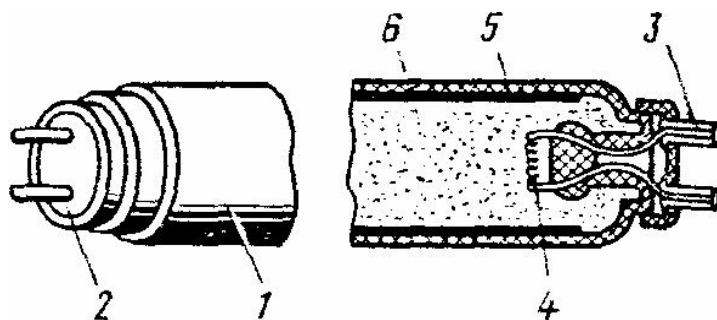


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд люмінесцентної лампи в розрізі:

- 1 – колба; 2 – цоколь; 3 – контактні штирі цоколя; 4 – електрод;
5 – шар люмінофора; 6 – ртутні пари

Електродами люмінесцентної лампи є вольфрамові нитки, вкриті пастою (активною масою) із лужноземельних металів, яка забезпечує стабільний дуговий розряд і захищає вольфрамові нитки від перегрівання. У процесі роботи паста поступово обсіпається з електродів, вигорає і випаровується (звідси потемніння на кінцях лампи, яке спостерігається з наближенням до закінчення терміну дії), особливо інтенсивним є обсіпання під час запуску.

Люмінофор – речовина, яка під дією УФ випромінювання здатна світитися.

Базовим матеріалом, з якого виготовляється люмінофор під час виробництва ЛЛ, є галофосфат кальцію, дозований марганцем і сурмою.

У дешевших лампах застосовується галофосфатний люмінофор, що випромінює здебільшого жовте і синє світло, менше червоне і зелене. Така суміш кольорів сприймається оком як біле світло, але внаслідок відбивання від

предметів світло може містити неповний спектр, що сприймається, як спотворення кольору. Зазвичай такі лампи відрізняються дуже високою світловою віддачею. У більш дорожчих лампах використовується «трисмуговий» і «п'ятисмуговий» люмінофори, що забезпечує більш рівномірний розподіл випромінювання за видимим спектром і уможливорює натуральніше відтворення світла. Однак такі лампи зазвичай характеризуються нижчою світловою віддачею.

Змінюючи пропорції компонентів, що входять у люмінофор, можна отримати ЛЛ з різною кольоровістю випромінювання. Приміром, для потреб освітлення випускають п'ять типів ЛЛ, які відрізняють за кольором випромінювання.

Трубчасті ЛЛ низького тиску з дуговим розрядом у парах ртуті за кольором випромінювання поділяються так:

- лампи білого світла (ЛБ, колірна температура 3 500 К);
- лампи тепло-білого кольору (ЛТБ, 2 700 К);
- лампи холодно-білого кольору (ЛХБ, 4 850 К);
- лампи денного світла (ЛД, 6 500 К) і лампи денного світла зі зміненою кольоровістю (ЛДЦ).

Лампи ЛД і ЛДЦ під час горіння набувають синьо-блакитного забарвлення і випромінюють світло, подібне до світла денного хмарного неба. Вони з достатньою точністю відтворюють кольори освітлюваних ними предметів. Їх варто застосовувати тоді, коли при штучному освітленні необхідно чітко розрізнення кольорів і відтінків, наприклад у приміщеннях, де здійснюються забарвлення або відбраковування за кольором продукції і матеріалів, у картинних галереях, магазинах готового одягу, тканин тощо.

Лампи ЛБ під час горіння набувають білого забарвлення і випромінюють світловий потік, склад якого наближається до складу світлового потоку ЛР. Вони не забезпечують узгодженості кольорів, але економніші, ніж лампи ЛД (мають більш високу світлову віддачу). Лампи ЛБ встановлюють там, де не потрібно чітко розрізняти кольори, наприклад в адміністративних, навчальних, лікувальних, конструкторських приміщеннях, у металообробних цехах тощо.

Лампи ЛХБ за спектральним складом посідають проміжне місце між лампами ЛД і ЛБ. Вони, як лампи ЛД, можуть застосовуватися в деяких випадках для освітлення приміщень, у яких потрібно забезпечити розрізненість колірних відтінків.

Лампи ЛТБ під час горіння набувають рожевого забарвлення і випромінюють біле світло з рожевим відтінком. Вони надають освітленим приміщенням вигляду парадності і затишку, тому їх варто застосовувати для

освітлення, наприклад, окремих приміщень палаців культури, танцювальних залів тощо.

Особливості запалювання люмінесцентних ламп

ЛЛ не можна увімкнути прямо в електричну мережу з таких двох причин:

– для запалювання дуги в ЛЛ необхідно попередньо прогріти електроди і забезпечити імпульс високої напруги;

– від’ємний диференціальний опір лампи, через який після її ввімкнення струм багаторазово зростає, якщо його не обмежити, лампа вийде з ладу.

Для запалювання ЛЛ і її сталої роботи потрібна додаткова апаратура, яка називається пускорегулювальною (далі – ПРА). Для вирішення зазначених вище проблем застосовують спеціальні пристрої – баласты, найпоширенішими із яких на сьогодні є електромагнітний баласт із неоновим стартером (рис. 2.8, а) та різні види електронних баластів (рис. 2.8, б).



а)

б)

Рисунок 2.8 – Пускорегулювальна апаратура для люмінесцентних ламп:

а) – електромагнітний баласт із неоновим стартером;

б) – електронний баласт

Електромагнітний баласт – це електромагнітний дросель, що вмикається послідовно з лампою. Паралельно до лампи вмикається стартер, що становить неонову лампу з біметалічними електродами та конденсатор. Дросель шляхом самоіндукції формує імпульс, що запускає лампу, а також обмежує струм через неї.

Перевагою електромагнітного баласту є простота конструкції, а недоліками є таке: довгий запуск (1–3 с залежно від ступеня зносу лампи); більше споживання енергії порівняно з електронною схемою; низькочастотний гул (100 Гц) від дроселя; мерехтіння лампи з подвоєною частотою мережі, що може зашкодити зору, а іноді й небезпечно (унаслідок виникнення

стробоскопічного ефекту ЛЛ з електромагнітним баластом не застосовують для освітлення рухомих частин верстатів і механізмів); великі габарити і маса.

У разі застосування електромагнітного баласту можуть використовуватися два варіанти запуску ламп:

– холодний запуск – коли лампа запалюється відразу після ввімкнення (така схема використовується, якщо лампа вмикається і вимикається зрідка, оскільки режим холодного запуску шкідливіший для її електродів);

– гарячий запуск – запуск із попереднім прогріванням електродів, лампа запалюється не відразу, а через 0,5–1 с, що дає змогу подовжити термін її дії, особливо в разі частих вмикань і вимикань.

У лампах з підігрівними катодами, розрахованими на великі струми (1–2 А), зазвичай використовуються спіральні активовані вольфрамові нитки розжарювання. Середній термін дії ламп з підігрівними катодами залежить від напрацювання на один пуск: 7 500 год при 3 год напрацювання на один пуск і понад 18 000 год при безперервному режимі.

У лампах з холодними катодами передбачаються циліндричні електроди з покриттям із емітерних матеріалів, вони розраховуються на менші струми. Термін дії ламп з холодними катодами не залежить від кількості пусків і сягає 25 000 годин.

Лампи з підігрівними катодами за способом пуску діляться на лампи з попереднім прогріванням, швидкого і моментального пуску.

У лампах швидкого пуску катоди нагріваються постійно, а розряд виникає при збільшенні напруги. Стартери не потрібні, і час пуску значно менший, ніж у лампах з попереднім прогріванням.

У лампах моментального пуску прогрівання ні катодів, ні стартера не потрібно. На катод тільки подається підвищена напруга, яка спричиняє емісію електронів і запалювання розряду в лампі.

Лампи з підігрівними катодами вмикаються в електричну мережу тільки послідовно з баластним пристроєм, що обмежує зростання струму в лампі і таким чином оберігає її від руйнування. У мережах змінного струму як баластний резистор застосовують конденсатор або котушку з великим індуктивним опором – дросель (рис. 2.9).

Стартер слугує для автоматичного ввімкнення і вимкнення попереднього напруження електродів і становить теплове реле, розміщене в скляному балоні, наповненому інертним газом, зазвичай неоном (рис. 2.9, а).

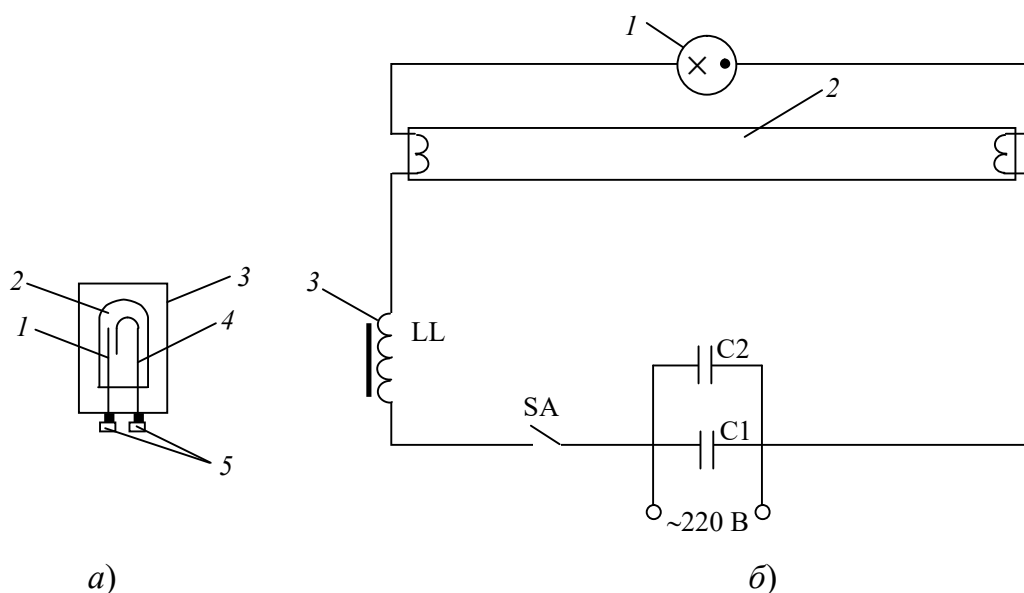


Рисунок 2.9 – Електрична схема ввімкнення люмінесцентної лампи в мережу:

- а – стартер (неонова лампа тліючого розряду): 1 – металевий електрод;
- 2 – скляний балон; 3 – захисна оболонка; 4 – біметалевий електрод;
- б – схема принципова: 1 – стартер; 2 – лампа; 3 – баластний дросель

Розглянемо імпульсне (стартерне) запалювання.

Реле має два електроди, один з яких біметалічний, а інший – металевий. Між електродами є проміжок у 2–3 мм. Величина проміжку, що встановлюється заводом-виробником, залежить від напруги мережі, до того ж напруга запалювання неонові лампи повинна бути меншою за напругу мережі і меншою за напругу запалювання ЛЛ з холодними електродами.

Дросель становить обмотку, намотану на осереддя з листової електротехнічної сталі. Він полегшує запалювання лампи, а також обмежує струм і забезпечує сталу роботу лампи. На рисунку 2.9, б наведено схему ввімкнення ЛЛ до мережі 220 або 127 В. Конденсатор С1 слугує для підвищення коефіцієнта потужності (унаслідок наявності в ланцюзі лампи дроселя $\cos \varphi = 0,6$ до $0,95$), а конденсатор С2 слугує для усунення радіозавад, спричинених роботою лампи.

Розглянемо фізичне опідгрунття роботи ЛЛ і процес її запалювання під час увімкнення в електричну мережу. Газ аргон, що міститься в трубці – хороший ізолятор, оскільки атоми і молекули газу в звичайних умовах становлять нейтрально незаряджені частинки.

Для проходження електричного струму через газ необхідно створити в ньому штучну електричну провідність, яка досягається шляхом іонізації. У разі ввімкнення лампи в електричну мережу процес іонізації газу відбувається внаслідок руху вільних електронів, що випускаються електродами, нагрітими

до 800 °С (термоелектрична емісія). Для збільшення виходу електронів з електродів вольфрамові спіралі вкривають тонким шаром окисів лужноземельних металів (барію, стронцію, кальцію).

Електрони, вилітаючи з електродів, під час руху бомбардують нейтральні атоми газу і перетворюють їх на частинки з електричним зарядом. Процес іонізації газу безперервно зростає, а отже, зростає його електрична провідність. Нарешті настає момент, коли в лампі виникає електричний розряд спочатку в розрядженому аргоні, а потім у парах ртуті, що спричиняє значне УФ випромінювання. Потрапляючи на порошкоподібний світлочутливий шар люмінофора, що вкриває всю внутрішню поверхню трубки, УФ випромінювання перетворює на видиме світлове випромінювання, що через скляні стінки трубки надходить у навколишній простір.

Розглянемо, як відбувається процес запалювання лампи.

При стартерному методі в момент ввімкнення лампи в електричну мережу електроди лампи і стартера опиняються під впливом напруги мережі. Однак цієї напруги недостатньо для запалювання лампи, до того ж у момент ввімкнення її електроди не можуть нагріватися, оскільки ланцюг розімкнутий. Однак підведена до проміжку між електродами стартера напруга мережі достатня для того, щоб у ньому виник розряд. Під дією тліючого розряду біметалева платівка нагрівається і, вигинаючись, взаємодіє з іншим електродом стартера. Ланцюг стартера замикається, і починається процес нагрівання електродів лампи.

Унаслідок нагрівання електродів виникає термоелектронна емісія, яка створює умови для запалювання лампи. Одночасно розряд в стартері зникає, і біметалева платівка остигає, випрямляється і розмикає електричний ланцюг. Завдяки наявності в ланцюзі дроселя з великою індуктивністю в момент розмикання виникає імпульс підвищеної напруги, який спричиняє потужний дуговий розряд і запалювання лампи. До того ж напруга на лампі стає меншою, ніж напруга мережі. Стартер, увімкнений паралельно з лампою, опиняється під дією самою меншою напругою, якої недостатньо, щоб у ньому виник новий розряд, тому в разі сталої роботи лампи стартер не діє. Якщо лампа з будь-яких причин не запалилася, стартер знову опиняється під напругою мережі, і процес запалювання повторюється.

Стартерна схема запалювання дуже проста і дешева, і тому вона набула найбільшого поширення. Окрім того, стартерна схема має низку недоліків, які становлять часті пошкодження стартерів, що нівелює надійність роботи схеми, а також мерехтіння лампи зі збільшенням терміну дії стартера.

Електронний баласт подає на електроди лампи напругу не з подвоєною частотою (як у разі електромагнітного баласту), а високочастотну (20–60 кГц), унаслідок чого виключається помітне для очей мерехтіння ламп.

Багато недоліків ЛЛ усуваються шляхом використання електронних високочастотних апаратів увімкнення, які останнім часом застосовуються все частіше. На рисунку 2.10 зображена спрощена блок-схема електронного ПРА (далі – ЕПРА). Апарат складається з випрямляча (1) перетворювача випрямленої напруги у високочастотну змінну (2). Напруга з виходу перетворювача через підсилювач (3) подається на лампу (4), увімкнену послідовно з дроселем (5).

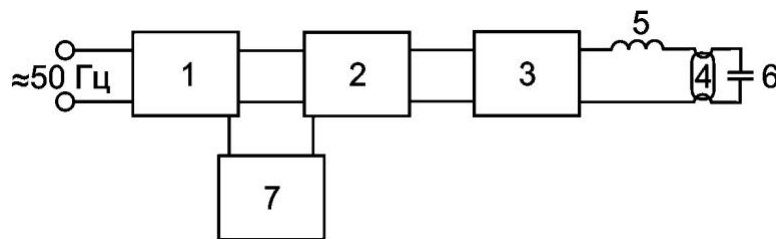


Рисунок 2.10 – Блок-схема ЕПРА

Оскільки частота напруги становить 20–40 кГц, розміри й маса дроселя значно менші за ті, що застосовуються в стартерних схемах запалювання. Паралельно до лампи вмикається конденсатор (6), ємність якого підбирається так, щоб на частоті напруги, яка подається на лампу, індуктивний опір дроселя і ємнісний опір конденсатора були однакові:

$$WL = \frac{1}{WC}. \quad (2.1)$$

При такому співвідношенні опорів виникає резонанс напруг.

Отже, у разі ввімкнення апарату через електроди лампи протікає струм, достатній для розігрівання їх до необхідної температури, а на конденсаторі створюється напруга, достатня для виникнення дугового розряду в лампі з підігрітими електродами. Після того як лампа запалиться, напруга в ній падає до напруги горіння, а частота напруги на виході перетворювача автоматично змінюється так, щоб через лампу протікав струм заданої величини.

Блок управління (7) виконує кілька функцій: стабілізація струму лампи при коливаннях напруги, компенсація реактивної потужності і регулювання світлового потоку ламп внаслідок змінювання частоти напруги на виході перетворювача.

При живленні ЛЛ змінним струмом з частотою, що перевищує 20 кГц, світловий потік збільшується на 15–20 %, термін дії лампи на 20–30 %, до того ж зникають два головні чинники негативного впливу на людину – пульсації світлового потоку і високий рівень звукового тиску.

Створення потужних, відносно дешевих ЕПРА високої частоти стало можливим тільки за відповідного рівня розвитку мікроелектроніки. Їхній головний недолік – значна вартість порівняно з низькочастотними баластами.

У наш час розроблені й успішно застосовуються схеми запалювання ЛЛ з ЕПРА на базі напівпровідникових приладів, що отримали назву енергозберігаючі, вони значно покращують якість освітлення. ЕПРА слугують для запалювання і стабілізації режиму роботи лампи, об'єднуючи в одній схемі функції дроселя (індуктивного баласта), стартера, що компенсує і завадозахисних конденсаторів (рис. 2.11).

ЕПРА відмикає несправні лампи, позбавляючи від дратівливого миготіння, а також вмикає лампи одночасно, без шуму і мерехтіння. Це збільшує термін дії ламп і зменшує витрати на їх обслуговування, забезпечуючи економію електроенергії на 20–30 %.

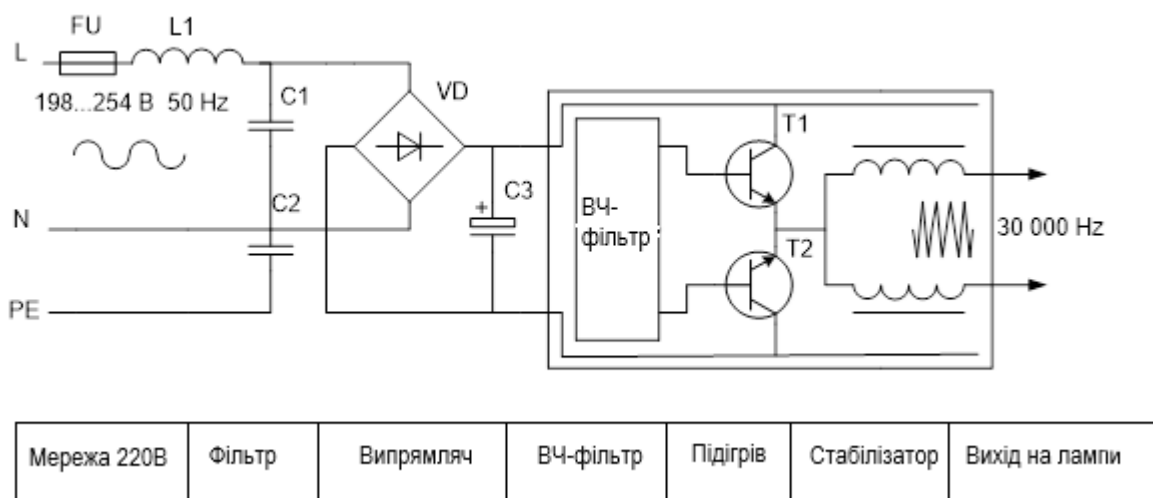


Рисунок 2.11 – Схема ЕПРА

Застосування високочастотних апаратів увімкнення уможливорює такі позитивні результати:

- унаслідок особливостей високочастотного розряду збільшується світлова віддача ламп;
- коефіцієнт пульсації світлового потоку з частотою 100 Гц зменшується до 5 %;
- унеможливорюються звукові перешкоди, створювані дроселями;

- унеможливаються миготіння ламп під час ввімкнення;
- збільшується термін дії ламп (у півтора рази);
- з'являється можливість регулювати світловий потік ламп;
- ЕПРА значно легші за апаратних, що дає змогу застосовувати їх в компактних люмінесцентних лампах.

Споживання електроенергії люмінесцентними світильниками у разі використання ЕПРА зазвичай знижується на 20–25 %.

Застосування ЕПРА з автоматичною підтримкою рівня освітленості залежно від рівня природного освітлення та наявності людей у приміщенні дає змогу економити до 85 % електроенергії, що витрачається на освітлення. Важливість такої економії стає зрозумілою, якщо врахувати, що на освітлення витрачається понад 100 млн кВт · год електроенергії на рік.

У 2000 році Енергетична комісія Європарламенту Європейського економічного союзу прийняла Директиву № 2000/55 / EG, яка дозволяє країнам-членам ЄС припинити з 1 грудня 2005 року виробництво електромагнітних ПРА. Це означає, що з 2006 року в країнах ЄС для ЛЛ повинні проводитися тільки ЕПРА.

Електричні та світлові характеристики. Експлуатаційні особливості

ЛЛ вмикаються в електричну мережу за допомогою ПРА для запалювання та забезпечення сталого режиму роботи. Це ускладнює конструкцію, а отже, впливає на вартість освітлювальних приладів та обумовлює деяку складність експлуатації, що безумовно є недоліком ЛЛ [1, 2, 4].

До **недоліків** ЛЛ можна віднести:

- складність утилізації через наявність в колбі ртуті;
- ненадійність роботи в температурних діапазонах до 15 °С і вище 25 °С;
- відносно низьку стабільність світлового потоку протягом терміну дії;
- миготіння лампи;
- наявність ПРА;
- малий діапазон потужностей;
- чутливість до зниження напруги;
- старіння лампи.

Крім зазначених недоліків, ЛЛ мають низку **переваг**, а саме:

- лінійне джерело світла, що забезпечує створення більш рівномірного освітлення і естетичне оформлення освітлювальної установки;
- відносно висока світлова віддача – до 100 лм/Вт;

- значний термін дії – до 10 000–12 000 год;
- низька яскравість і температура поверхні колби;
- якісна передача кольору (у окремих серій ламп);
- відносно невисока собівартість виготовлення.

Трубочасті ЛЛ розрізняються за діаметром і за типом цоколя, мають такі позначення: Т4 (1,27 см), Т5 (1,59 см), Т8 (2,54 см), Т10 (3,17 см) і Т12 (3,80 см) (рис. 2.12).

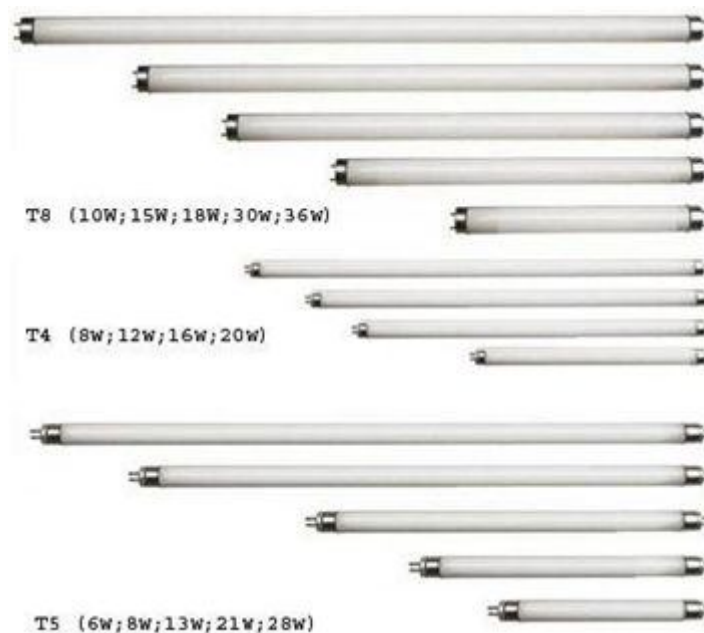


Рисунок 2.12 – Трубочасті люмінесцентні лампи

Потужність ламп. Вітчизняною промисловістю випускаються ЛЛ загального призначення з потужністю 18, 20, 36, 40, 58, 65 Вт; спеціального призначення (наприклад фітолампи) – 14, 15, 28 Вт; компактні люмінесцентні лампи – 5–150 Вт.

Світлова віддача. Світлова віддача ЛЛ в кілька разів вища, ніж у ЛР, і перебуває в межах 50–80 лм/Вт. Звідси випливає, що при однаковій освітленості витрачувана потужність на освітлення ЛЛ буде меншою, у разі використання ЛР.

Тривалість горіння. Середній гарантований термін дії ЛЛ становить 10 000 годин, мінімальний термін дії – не менше 4 000 годин. Термін дії лампи здебільшого визначається часом витрачання оксидного покриття електродів. Збільшенню витрати оксидного покриття сприяє частота вмикань ЛЛ люмінесцентної лампи, оскільки що рідше вмикається лампа, то менше зношується оксидний шар електродів. Зменшення напруги в мережі або

зниження температури також скорочують термін дії, оскільки у цьому разі різко погіршуються умови запалювання лампи, що призводить до посилення розпорошування оксидного покриття електродів.

Вплив коливання напруги. При невеликому змінюванні напруги, коли лампа вмикається в межах $\pm 1\%$ порівняно з номінальним значенням, світловий потік збільшується або знижується також на 1% . При великих відхиленнях напруги від номінальної ($10\text{--}15\%$) лампи можуть взагалі не запалюватися, або їх запалювання може супроводжуватися тривалим миготінням. При зменшенні напруги на 20% запалена лампа тухне, при підвищеній вологості підвищується напруга запалювання лампи. Підвищення напруги призводить до збільшення тиску парів ртуті в лампі, унаслідок чого знижується ефективність її роботи.

Вплив температури навколишнього середовища. Коливання температури навколишнього середовища значно впливає на нормальну роботу ЛЛ. Оптимальною температурою середовища, при якій лампа випромінює найбільший світловий потік, є температура в межах $20\text{--}25\text{ }^\circ\text{C}$. У разі відхилення температури навколишнього середовища в той чи інший бік відносно оптимальної світловий потік значно зменшується. При температурах зовнішнього середовища, близьких до $0\text{ }^\circ\text{C}$ в лампі розряд не виникає, тому ЛЛ здебільшого використовують для освітлення опалювальних приміщень при звичайній температурі від 20 до $25\text{ }^\circ\text{C}$. У разі роботі ЛЛ при нижчих температурах навколишнього середовища (вуличне освітлення) їх розміщують у спеціальних герметичних прозорих ковпаках, у яких створюють необхідні температурні умови, або для сталості їхньої роботи застосовують спеціальні схеми запалювання.

Залежність світлових і електричних характеристик ламп від температури колби зумовлена фізичними особливостями ртутного розряду. Температура колби значною мірою визначається температурою навколишнього середовища. Отже, температура повітря, що оточує лампу, повинна перебувати в межах $5\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$, до того ж номінальні світлові потоки ламп можуть утворюватися тільки в межах температури повітря $18\text{--}25\text{ }^\circ\text{C}$, що передбачає температуру її стінок $40\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$. У закритих світильниках температура повітря значно перевищує зазначені межі, унаслідок чого лампи в процесі сталої експлуатації створюють світловий потік менший за номінальний.

Серед ЛЛ переваги під час роботи при підвищеній температурі навколишнього середовища мають амальгамні лампи, у яких ртуть використовуються у вигляді амальгами. Залежно від способу установки, їх застосовують для роботи в одному з двох режимів: за температури навколишнього повітря $5\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$ або за температури $30\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}$, до того ж в

останньому випадку ці лампи забезпечують світловий потік на 25 % більший за стандартні.

Пульсація світлового потоку. Світловий потік ЛЛ внаслідок безінерційного розряду, як і струм, змінюється від максимального значення до нуля і назад 100 раз за секунду при частоті змінного струму 50 Гц. Однак унаслідок того, що застосовувані люмінофори мають здатність після припинення їх опромінення УФ променями (струм проходить через 0) ще деякий час випромінювати видиме світло (інерція свічіння), світловий потік лампи не падає до нуля, а набуває деякої мінімальної величини.

Пульсація світлового потоку характеризується **коефіцієнтом пульсації**:

$$K = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{2\Phi_{\text{cp}}}, \quad (2.2)$$

де Φ_{\max} , Φ_{\min} , Φ_{cp} – максимальне, мінімальне та середнє значення світлового потоку лампи відповідно, лм.

Коефіцієнт пульсації визначається складом люмінофора і схемою ввімкнення в мережу (25–40 %).

Під час ввімкнення ламп у мережу змінного струму коефіцієнт пульсації у ЛЛ типу ЛБ становить 35 %, а у лампах типу ЛДЦ – 55 %. Пульсація світлового потоку обумовлена згасанням та перезагоранням лампи за кожен напівперіод змінного струму.

Унаслідок пульсації (коливань) освітленості в часі від його середнього значення виникає стробоскопічний ефект. Сутність цього явища полягає в тому, що при певних швидкостях обертання механізму виникає викривлене зорове сприйняття. Приміром, колесо, що обертається, може здаватися нерухомим або таким, що обертається в протилежний бік. Рухомий предмет може сприйматися як багаторазове миготіння рухомих контурів цього предмета. Такий обман зору, особливо в цехах, де деталі верстатів обертаються, може спричинити серйозні травми й аварії. Коливання світлового потоку також призводять до стомлення зору, унаслідок чого знижується працездатність. Щоб зменшити коефіцієнт пульсації застосовують декілька способів. Найпоширенішим є ввімкнення ламп у різні фази трифазної мережі, що зменшує коефіцієнт пульсації до 6 %. Істотно зменшити коефіцієнт пульсації можна також шляхом застосування спеціальних дволампових схем зі штучним зміщенням фаз, які називають антистробоскопічними.

Компактні люмінесцентні лампи

Значна довжина ЛЛ – їхній недолік. Зменшувати довжину й досягати потрібних потужностей унаслідок збільшення струму розряду вдається нераціональним, оскільки в цьому разі збільшується температура, що призводить до збільшення тиску парів ртуті і зменшення світлової віддачі ламп. Із огляду на це розробники ламп намагалися зменшити їхні габарити за допомогою змінювання форми. Випускалися вигнуті V-подібні і W-подібні лампи, а також кільцеві [4, 7].

У середині 90-х років на світовому ринку з'явилося нове покоління ЛЛ – **компактні люмінесцентні лампи (далі – КЛЛ)**.

Початковою метою випуску КЛЛ була необхідність створити енергоефективні лампи з відносно невеликим світловим потоком для застосування в побутових приладах.

Колби почали виготовлювати зі скляних трубок із зовнішнім діаметром 12 мм і багаторазово згинати їх, зменшуючи таким чином габарити лампи. У конструкції КЛЛ було застосовано дуже важливе нововведення – люмінофор із внутрішнього боку вкрили тонкою захисною плівкою, прозорою для УФ і видимого світлового випромінювання. Плівка захищає люмінофор від потрапляння на нього частини ртуті, що активує і покриття вольфраму з електродів, унаслідок чого забезпечується сталість світлового потоку протягом усього терміну дії.

Таким чином, усі ЛЛ можна розділити на дві великі групи – лінійні та компактні.

КЛЛ, зі свого боку, поділяються на дві групи – з зовнішнім апаратом увімкнення і з убудованим.

Лампи першої групи виготовляються з потужністю від 5 до 55 Вт. Циліндрична колба лампи може бути вигнута один, два, три і навіть чотири рази. Цоколі у всіх лампах цієї групи спеціальні, із двома або чотирма зовнішніми штирями. Кожен номінал лампи має свій особливий цоколь, що виключає можливість ввімкнення лампи якої-небудь однієї потужності в арматуру, призначену для ламп іншої потужності.

Компактні лампи другої групи розпочали випускати в 1986 році фірмами «Philips», «Osram», «General Electric». Такі лампи мають звичайний різьбовий цоколь типу E27, E40, за розмірами і формою нагадують звичайні ЛР, їх маса становить не більше 100 грамів (рис. 2.13). Термін дії КЛЛ становить від 6 000 до 15 000 годин.



Рисунок 2.13 – Компактні люмінесцентні лампи

Компактні люмінесцентні лампи мають цілу низку переваг щодо ЛР: світлова віддача приблизно в 5 разів вища, термін дії у 8–10 разів більший. Єдиним недоліком таких ламп є відносно висока вартість.

Маркування люмінесцентних ламп

Маркування люмінесцентних ламп складається з букв, що позначають конструктивні ознаки, і цифр, що вказують на потужність ламп:

- перша буква – тип лампи Л – люмінесцентна, ТЛ – сигнальні, ЛЛ – тліючого розряду, ГР – трубки для світлової реклами;
- друга буква – колір випромінювання Б – білий, ТБ – тепло-білий, ХБ – холодно-білий, Д – денний, Е – природно-білий, УФ – ультрафіолетовий, Ч – червоний, С – синій, З – зелений, Б – блакитний;
- третя група букв – одна або дві букви Ц – висока або дуже висока якість передачі кольору;
- четвертий елемент – одна буква – особливості конструкції лампи: Р – рефлекторна, У – U-подібна, К – кільцева, Ш – швидкого пуску, А – амальгамна;
- п'ятий елемент – група цифр – потужність лампи у ватах.

Трицифровий код на упаковці лампи зазвичай містить інформацію щодо якості світла (індекс передачі кольору).

Перша цифра – індекс передачі кольору в 110 R_a (КЛЛ мають 60–98 R_a ; що вищий індекс, то краща передача кольору).

Друга і третя цифри вказують на колірну температуру лампи.

Приміром, маркування «827» вказує на індекс передачі кольору у 80 R_a і колірну температуру у 2 700 К (що відповідає колірній температурі ЛР).

Сфери застосування. Різновиди люмінесцентних ламп

ЛЛ доцільно застосовувати для організації загальної системи освітлення, насамперед приміщень великої площі. ЛЛ широко застосовуються і для влаштування місцевого освітлення, у світловій рекламі, для підсвічування фасадів. Вони використовуються для підсвічування рідкокристалічних екранів. Плазміні дисплеї також є різновидом ЛЛ.

Існують спеціальні ЛЛ із різними спектральними характеристиками: 5 400 К; 6 500 К тощо.

Лампи, що задовольняють найвищі вимоги щодо передачі природного кольору денного освітлення мають колірну температуру 5 400 К. Такі лампи використовують, якщо необхідно усунути ефект кольорової мімікрії; коли потрібно створити живе денне світло, приміром у друкарнях, стоматологічних кабінетах і лабораторіях, під час перегляду діапозитивів і в спеціалізованих магазинах текстильних товарів.

Лампи, що випромінюють світло, яке за своєю спектральною характеристикою подібне до сонячного (колірна температура – 6 500 К). Такі лампи рекомендуються для приміщень, де недостатньо денного світла, приміром у офісах, банках і магазинах.

Лампи для рослин і акваріумів з посиленням випромінюванням у спектральному діапазоні синього і червоного світла. Вони позитивно впливають на фотобіологічні процеси. Ці лампи випромінюють світло з мінімальним умістом УФ складника типу А (за абсолютної відсутності УФ складників типу В і С).

Декоративні лампи червоного, жовтого, зеленого та синього кольорів придатні для декоративного освітлення і створення спеціальних світлових ефектів. Крім того, ЛЛ жовтого світла не містить УФ складника, тому її рекомендують для цехів із виготовлення мікросхем, а також для загального освітлення без УФ-випромінювання.

ЛЛ, призначені для освітлення приміщень, у яких є птахи. Спектр цих ламп містить ближній УФ, що дає змогу створити більш комфортне для них освітлення, наблизивши його до природного, тому що птахи, на відміну від людей, мають чотирикомпонентний зір.

Лампи, призначені для освітлення м'ясних прилавків у супермаркетах. Світло цих ламп має рожевий відтінок, унаслідок такого освітлення м'ясо набуває більш апетитного вигляду, що приваблює покупців.

ЛЛ для соляріїв і косметичних салонів бувають трьох виконань: 78R; 79 і 79 R. Лампи 78R характеризуються наявністю практично чистого УФ випромінювання типу А понад 350 нм. У разі опромінення в цьому діапазоні

для нормальної шкіри небезпеки одержати опік практично не існує. Якщо опромінення тривале, то з'являється спочатку пігментація шкіри, а потім ефект засмаги вже після першого сеансу. Лампи 79 і 79R з високою потужністю УФ випромінювання типу А спричиняють пігментацію, із частковим УФ випромінюванням типу В – утворення пігменту. Якщо значення УФ складника типу В мінімальне, то й ризик одержання сонячного опіку мінімальний. Лампи, що діють аналогічно до сонячного світла, повинні мати велику частку УФ випромінювання типу А і необхідну частку біологічно ефективного випромінювання типу В. Регулярне прийняття процедур опромінення забезпечує тривалу пігментацію шкіри і утворення стійкої засмаги.

УФ ЛЛ з колбами з «чорного» скла. Різні матеріали мають здатність перетворювати невидиме УФ випромінювання на світлове випромінювання (створювати ефект люмінесценції). Такі лампи становлять випромінювачі з довгохвильовим УФ випромінюванням, що спричиняє люмінесценцію. Ці лампи є незамінними джерелами випромінювання для будь-яких видів досліджень із застосуванням люмінесцентного аналізу. Вони генерують своє випромінювання тільки в довгохвильовому УФ діапазоні – від 300 до 400 нм, що не сприймається оком і зовсім нешкідливо. Видиме випромінювання поглинається поглинається майже повністю.

Сфери застосування:

- матеріалознавство: дослідження матеріалів за допомогою люмінесценції, наприклад виявлення найтонших тріщин валу двигуна;
- текстильна промисловість: аналіз матеріалів, наприклад хімічного складу і видів домішок у вовняних матеріалах. Розпізнавання невидимих забруднень і можливих плям після чищення;
- харчова промисловість: виявлення фальсифікацій у продуктах харчування, місць гниття у фруктах (особливо в апельсинах), м'ясі, рибі тощо;
- криміналістика: виявлення фальшивих банкнот, чеків і документів, а також внесених у них змін, вилучених плям крові, подробиць картин тощо;
- пошта: раціональна обробка кореспонденції за допомогою автоматичних штемпельних машин для конвертів, перевірка дійсності поштових марок;
- створення світлових ефектів на сценах драматичних і музичних театрів, у кабаре, вар'єте, дискотеках;
- сільське господарство: перевірка посівного матеріалу;
- мінералогія: перевірка дорогоцінних каменів;
- інші сфери застосування: реклама й оформлення вітрин.

Випромінювальні прилади для стерилізації й озонування. Такі випромінювачі завдяки своєму короткохвильовому УФ-випромінюванню типу

С забезпечують бактерицидну дію і тому застосовуються для стерилізації. Раціональне застосування таких випромінювачів гарантується тільки в спеціальних, призначених для них установках.

Сфери застосування:

- стерилізація води: питної, води для плавальних басейнів, стічних вод;
- стерилізація і дезодорація повітря в кондиціонерах, лікарнях, складських приміщеннях;
- стерилізація поверхонь у фармацевтичній і пакувальній промисловості;
- стирання інформації із сучасних мікроелектронних блоків пам'яті (ППЗУ) за допомогою ламп HNS G5 OFR і HNS 10/U OFFS.

– лампи зі спеціальними кольірними характеристиками: LF71 – для полімеризації пластмас, клеїв, лаків, фарб на глибину не більше 1мм; лікування гіпербілірубемії; LF78 – для полімеризації пластмас, клеїв, лаків, фарб на глибину понад 1мм; лікування псоріазу; для розпізнавання підробок.

Розрахунок люмінесцентної лампи

Для досягнення найбільшої ефективності розряду в колбі необхідно підтримувати певну температуру. Діаметр колби обирають саме з цього міркування. У всіх ЛЛ забезпечується приблизно однакова щільність струму. Падіння напруги на лампі прямо пропорційне її довжині, тому лампи різної потужності, виконані в колбах одного діаметра, мають різну довжину.

Вихідними даними для розрахунку ЛЛ зазвичай є потужність лампи ($P_{л}$); тип ЛЛ за спектральним складом випромінювання (наприклад ЛБ, ЛДЦ тощо) і температура навколишнього середовища ($t_{навк}$), у якій працює лампа [8].

Очевидно, що зазначеним вихідним даним може відповідати велика багато варіантів ЛЛ, що відрізняються конструктивними (d , $I_{д}$, вид і тиск газу, що наповнює), електричними (струм лампи I , напруга $U_{л}$), світлотехнічними (Φ , η), експлуатаційними (строк дії τ , стабільність світлового потоку лампи в часі) та економічними параметрами (вартість лампи).

Обрати найраціональніший варіант лампи, керуючись тільки одним параметром (за винятком спеціальних випадків використання), неможливо з огляду на відому суперечність перелічених показників (наприклад, лампи з високою світловою віддачею можуть мати короткий термін дії, значну довжину трубки, тобто більшу вартість). Крім того, такий шлях відбору ламп масового використання буде недоцільним, тому що характеристики ламп значною мірою визначають показники інших елементів освітлювальної установки із ЛЛ, зокрема світильників та пускорегулювальних апаратів (наприклад, збільшення довжини лампи $l_{л}$ призводить до збільшення розмірів, а отже, і вартості

світильника; зменшення напруги на лампі при постійній нарузі постачальної мережі призводить до збільшення габаритів, ваги, вартості ПРА, витрат електроенергії в ній тощо).

Отже, характеристики лампи значно впливають на економічну ефективність освітлювальної установки (далі – ОУ) загалом, тому єдино правильним критерієм відбору найдоцільнішого варіанта лампи заданої потужності потрібно вважати економічний показник ОУ (промислового освітлення), за який приймають наведені річні затрати $C + \frac{K}{T_n}$, де C – частина річних експлуатаційних витрат, що змінюється; K – частина капітальних витрат, що змінюється, тобто собівартість ОУ; T_n – нормативний термін окупності ОУ.

Розрахований варіант лампи, що забезпечує мінімум річних приведених затрат в установці з урахуванням реальних умов її обслуговування (спосіб заміни ламп в установці, періодичність чищення світильників тощо), вважається найкращим.

Серед наявних методів визначення геометричних параметрів ЛЛ – методу розрахунку на оптимальне питома навантаження ($\omega_{\text{опт}}$) та багатоваріантного методу розрахунку – потрібно обрати останній, оскільки лампи з оптимальним питомим навантаженням зазвичай не забезпечують найкращих економічних показників освітлювальних установок (наприклад, потужні ЛЛ $P_{\text{л}} > 100$ Вт із оптимальним питомим навантаженням можуть бути малоєфективними, незважаючи на високу світлову віддачу, оскільки внаслідок значної довжини таких ламп збільшується їх вартість і вартість ПРА; останнє пов'язане з тим, що збільшення $l_{\text{л}}$ лампи супроводжується збільшенням напруги її запалу).

При використанні багатоваріантного методу розраховують варіанти ЛЛ заданої потужності на різні напруги постачальної мережі (U) зі змінними співвідношеннями напруги на лампах ($U_{\text{л}}$) до напруги мережі ($m = \frac{U_{\text{л}}}{U}$), діаметрами трубок, видом і тиском ($P_{\text{нг}}$) наповнювального інертного газу, після чого проводять економічне співставлення варіантів ламп за вказаними річними витратами в ОУ. Таким чином, для розрахунку ЛЛ, окрім початкових даних, необхідно обґрунтовано вибрати діапазони змінювання ще п'яти параметрів: U , m , d_2 , різновид інертного газу та його тиск.

Утилізація люмінесцентних ламп

До недоліків ОУ із ЛЛ відносять також необхідність спеціальної утилізації (демеркуризації) ламп, що вийшли з ладу. Усі ЛЛ містять ртуть (у дозах від 40 до 70 мг). Ця доза може заподіяти шкоду здоров'ю, якщо лампа

розбилася, і якщо постійно зазнавати згубного впливу парів ртуті, то вони будуть накопичуватися в організмі людини, завдаючи шкоди здоров'ю. У КЛЛ міститься 2–3 мг ртуті (для порівняння: у термометрі – 2 мг); у деяких типах амальгамних КЛЛ ртуті в чистому вигляді практично немає – вона перебуває у зв'язаному стані.

Сполуки ртуті в ЛЛ небезпечні, ніж металева ртуть (ртуть належить до отруйних речовин I класу небезпеки – «надзвичайно небезпечні»).

Після закінчення терміну дії лампу зазвичай викидають, не переймаючись проблемами її утилізації. Таким чином, ртуть потрапляє у воду, повітря, ґрунти, унаслідок чого збільшується її вміст, який перевищує гранично допустиму концентрацію (далі – ГДК), що позначається на здоров'ї людини. Для порівняння: у Німеччині понад 150 т ртуті щорічно повертають із відходів люмінесцентних трубок і вимикачів.

2.3 Випромінювання ртутного розряду високого тиску

При підвищенні тиску і щільності струму розряд стає все ефективнішим. Підвищення ефективності розряду пов'язано з наявністю нерезонансного випромінювання. Унаслідок відносно малого потенціалу іонізації ртуті запалювання розряду за наявності аргону можливе при тому тиску парів ртуті, яке наявне при сталій температурі. У процесі проходження струму через газорозрядний проміжок стінки трубки нагріваються, що спричиняє збільшення тиску парів ртуті. Коли температура стінки досягає температури кипіння ртуті, вона повністю випаровується і подальше підвищення тиску її парів стає пропорційним середній температурі стінки. Кінцевий тиск, якого досягають пари ртуті в лампі, буде залежати від кількості ртуті і струму, що визначається для газорозрядної лампи параметрами баласту, тобто тиск парів ртуті залежить від кількості введеної в лампу ртуті; потужності, що розсіюється в лампі; розмірів колби та умов охолодження.

Для ртутного розряду високого тиску абсолютна температура розряду, при якій настає температурна рівновага й ізотермічна плазма, приблизно дорівнюють 5 500 К. Стягування розряду є наслідком високої температури на осі розряду при температурі стінки трубки близько 1 000 К.

Спектр випромінювання ламп високого тиску створюється внаслідок переходу збуджених атомів у сталий стан, рекомбінації електронів та іонів, а також зіткнення метастабільних атомів та їх перехід у збуджений стан із подальшим випромінюванням фотонів. Головними особливостями випромінювання, на які варто звертати увагу, оскільки вони визначають способи використання розряду цього типу, є наявність, окрім випромінювання

у видимій області спектра, значного випромінювання в УФ області, особливо в інтервалі довжин хвиль 300–400 нм, і повна відсутність випромінювання в червоній області видимого спектра в інтервалі довжин хвиль 600–700 нм. Ці особливості випромінювання спричиняють при застосуванні дугового розряду високого тиску для цілей освітлення необхідність виправлення його кольоровості шляхом перетворення УФ випромінювання на червоне.

Речовини, що наповнюють колбу

Для зменшення напруги запалювання розряду в лампі високого тиску, як і в ЛЛ, вводять деяку кількість інертного газу. Наявність інертного газу зменшує розпилення катодів і позитивно впливає на термін дії ламп. Однак на відміну від ЛЛ, інертний газ у лампах високого тиску відіграє й негативну роль. Наявність газу зменшує швидкість іонів в початковій стадії розігрівання. Із розгоранням лампи вплив інертного газу стає негативним унаслідок збільшення теплових втрат. Це обумовлено тим, що теплопровідність усіх інертних газів, крім ксенону, більша, ніж у ртуті.

Оскільки рівні збуджених атомів інертних газів вищі, ніж рівні збудження атомів ртуті, енергія електронів здебільшого не достатня для збудження інертного газу, тому його наявність у лампах високого тиску призводить тільки до збільшення теплових втрат.

У лампи високого тиску, крім інертних газів, вводять інші домішки, які впливають на випромінювання. Зокрема, для поліпшення передачі кольору ртутних ламп високого тиску в них додають кадмій або цинк. У цих елементів енергетичні рівні розташовані нижче, порівняно з рівнями ртуті, тому навіть при порівняно низькому тиску парів цих елементів відбувається випромінювання їхніх ліній.

Конструкція пальника

Для отримання ртутного розряду високого тиску використовують трубчасті кварцові лампи, які прийнято називати **пальниками**.

У кварцову трубку з обох кінців запаяні оксидні катоди, що розжарюються. Оскільки лампи розраховані на роботу в мережі змінного струму, обидва електроди однакові і по чергово виконують роль катода і анода.

При виборі конструкції катода (так називають електроди з огляду на те, що цей період їх роботи є найважливішим) доводиться враховувати період розгорання лампи, протягом якого розряд поступово переходить від розряду низького тиску до розряду високого тиску.

Залежно від умов розряду застосовують електроди різної конструкції. Зазвичай вони складаються з двох головних частин – запалювальної і робочої. Запалювальна частина містить запас активної речовини і слугує для полегшення запалювання та роботи в період розгорання, особливо небезпечний щодо розпилення матеріалу катода. Робоча частина електрода, оскільки виникає важкий тепловий режим, виготовляється винятково з вольфраму, що відрізняється найбільш високою температурою плавлення і незначною швидкістю випаровування. Для зниження робочого виходу вольфрам часто застосовується з активуючими присадками, наприклад торієм.

Розміри кварцового пальника обирають на підставі параметрів розряду, від яких залежить відстань між електродами, і температурного режиму, тобто тиску парів ртуті. Колба пальника нагрівається внаслідок використання енергії розряду. Ця енергія передається через стінки колби до її зовнішньої поверхні, звідки відбувається подальше розсіювання енергії в газ, що наповнює зовнішню колбу, або в зовнішнє середовище.

2.4 Розрядні лампи високого тиску

Ртутні лампи високого тиску (ДРЛ)

Люмінесцентні лампи – це лампи низького тиску. Спектр випромінювання у них лінійчастий з переважанням УФ променів. При підвищенні тиску всередині трубки відбувається перерозподіл енергії, а саме: частка УФ випромінювання зменшується, випромінювання у видимій частині спектру збільшується. При тиску парів ртуті близько 1 000 мм рт. ст. видиме випромінювання зростає настільки, що світлова віддача досягає 20–25 лм/Вт, тобто стає більшою, ніж у ЛР. Однак воно зосереджене у фіолетово-зеленій частині спектра. УФ випромінювання становить при цьому близько 40 % енергії, що підводиться. За допомогою фотолюмінесценції його можна перетворити на видиме випромінювання. Проблема полягає у відсутності люмінофорів, що ефективно працюють при температурі 500–600 °С, а саме до такої величини нагріваються стінки колби ртутних ламп високого тиску. Вихід було знайдено так: малогабаритну розрядну трубку помістили всередині більшої за розміром скляної трубки, на внутрішню поверхню якої і нанесли люмінофор, що випромінює переважно в червоній області спектра. Конструкція дугової ртутної лампи (далі – ДРЛ) подана на рисунку 2.14.

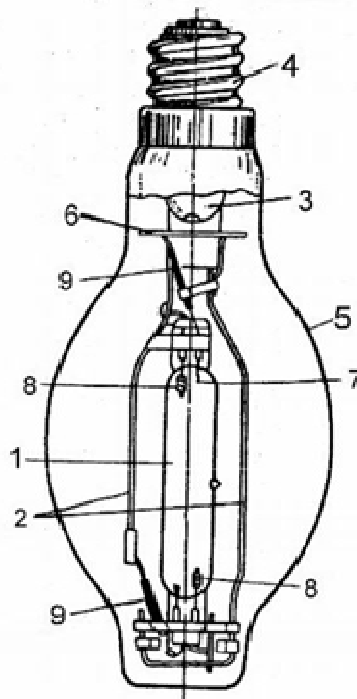


Рисунок 2.14 – Лампа типу ДРЛ:

- 1 – пальник; 2 – тримачі; 3 – ніжка; 4 – цоколь; 5 – зовнішня колба;
 6 – екран-обмежувальні резистори в ланцюзі запалювальних електродів;
 7 – головні електроди; 8 – запалювальні електроди

Розрядна кварцова трубка (1), що називається **пальник**, закріплена тримачами (2) на ніжці (3), герметично впаяний у зовнішню колбу (5). Скляна колба у вигляді грушоподібного балона слугує для ізоляції пальника від навколишнього середовища. Простір між пальником і колбою заповнюється технічним аргоном. На внутрішній поверхні колби нанесений люмінофор. У потужних лампах пальник підтримується ще й пружним тримачем, що впирається в зовнішню колбу. Для полегшення запалювання і поліпшення умов роботи електродів (7), встановлених по кінцях розрядної трубки, у пальник вводиться дозована кількість ртуті і аргону. Крім основних електродів, у лампі є запалювальні електроди (8), розташовані поблизу базових і електрично з'єднані з протилежними електродами через обмежувальні опори (9). На зовнішній колбі за допомогою високотемпературної мастики кріпиться стандартний різьбовий цоколь (4). Між пальником і цоколем встановлений тепловий екран (6).

Схема ввімкнення ртутних ламп високого тиску простіша, ніж ЛЛ. Завдяки наявності електродів, що підпалюють, розташованих дуже близько до базових, розряд між цими електродами виникає при напрузі нижче мережевої. Цей розряд дуже слабкий, тому що його струм обмежений опорами (9), але він створює початкову іонізацію газу в пальнику, за допомогою якої розряд

переводиться на базові електроди. Струм базового розряду обмежується тільки дроселем, і величина його протягом першої години після вмкнення в 2–3 рази більша, ніж після повного розгорання лампи. Розряд розігріває базові електроди до температури 1 000–1 200 °С, що забезпечує достатню емісію електронів із них. Унаслідок значної сили струму розряду стінки пальника починають розігріватися, і ртуть, що на них знаходиться, повністю випаровується. Процес горіння в лампі стабілізується. Процес розгорання триває від 7 до 10 хвилин. Повторно запалити згаслу лампу можна лише після її охолодження, тобто через 10–15 хвилин.

Лампи ДРЛ випускаються потужністю 80, 125, 250, 400, 700 і 1 000 Вт. Їхня світлова віддача становить від 40 до 60 лм/Вт, середня тривалість горіння с не менше 15 000 годин.

До **переваг** ламп ДРЛ можна віднести їх компактність, простоту ввімкнення, незначну залежність параметрів від температури навколишнього середовища.

Недоліками таких ламп є наявність ртуті, низька якість передачі кольору, значні пульсації світлового потоку, неможливість повторного включення гарячої лампи, тривалий період розгорання, висока температура на зовнішній колбі.

Ртутні лампи високого тиску широко застосовуються там, де якісна передача кольору не важлива, у вуличному освітленні, на складах і на промислових підприємствах.

Металогалогенні лампи

Металогалогенна лампа (ДРІ або МГЛ), конструкцію якої подано на рисунку 2.15, являє собою ртутну лампу високого тиску, у колбу якої вводяться домішки у вигляді **галогенідів різних металів**. Галогеніди металів випаровуються легше, ніж метали, що уможливорює широке варіювання спектрального розподілу випромінювання і збільшення світлової віддачі порівняно з лампами ДРЛ.

Пристрій і принцип дії МГЛ базується на тому, що галогеніди багатьох металів випаровуються легше, ніж самі метали, і не руйнують кварцове скло. Отже, всередину колб МГЛ, крім ртуті і аргону, додатково вводять різні хімічні елементи у вигляді їх галоїдних сполук, наприклад йод, бром, хлор. Після запалювання розряду, коли досягається робоча температура колби, галогеніди металів частково переходять у пароподібний стан. Потрапляючи в центральну зону розряду з температурою кілька тисяч градусів Кельвіна, молекули галогенідів дисоціюють на галоген і метал. Атоми металу збуджуються і

випромінюють характерні для них спектри. Дифундуючи за межі розрядного каналу і потрапляючи в зону з нижчою температурою біля стінок колби, вони з'єднуються в галогеніди, які знову випаровуються. Такий замкнутий цикл забезпечує деякі переваги стосовно ламп ДРЛ. По-перше, у розряді створюється концентрація атомів металів, що дають необхідний спектр випромінювання, так як при робочій температурі кварцовою колби 800–900 °С тиск парів галогенідів багатьох металів значно вищий, ніж самих металів, таких як талій, індій, скандій, диспрозій тощо.

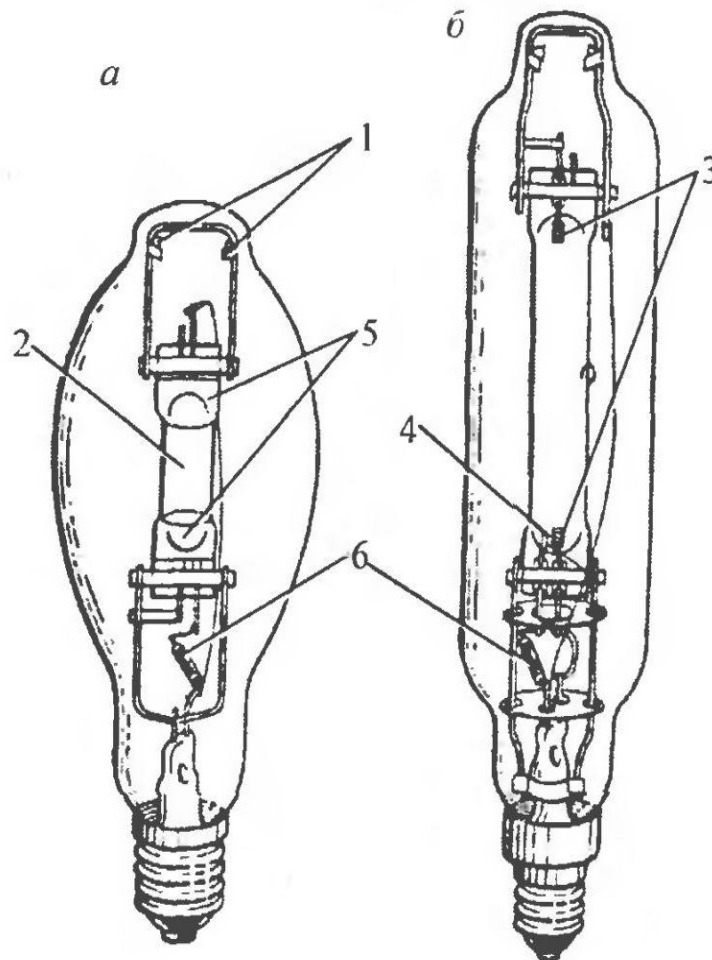


Рисунок 2.15 – Загальний вигляд металогалогенних ламп:

а – лампа 400 Вт в еліпсоїдній прозорій колбі; б – лампа 2 000 Вт в циліндричній прозорій колбі; 1 – пружні розпірки; 2 – розрядна трубка; 3 – основні електроди; 4 – запалювальний електрод; 5 – утеплювальне покриття; 6 – обмежувальний термостійкий опір

По-друге, з'являється можливість вводити в розряд лужні метали – натрій, літій, цезій та інші агресивні метали (наприклад кадмій, цинк), які в

чистому вигляді спричиняють швидке руйнування кварцового скла, а у вигляді галогенідів – ні.

Для загального освітлення в наш час широко застосовуються МГЛ з таким складом металогалогенних домішок (крім ртуті і запалювального газу):

- іодиди натрію, талію та індію;
- іодиди натрію, скандію і торію.

Лампи мають спектр, що складається з окремих ліній ртуті і домішок, розташованих в різних областях спектра, завдяки чому вдається поєднувати високу світлову віддачу з прийнятною якістю передачі кольору.

До **переваг** МГЛ можна віднести: високий рівень передачі кольору, високу світлову віддачу, відсутність люмінофорного покриття, широкий діапазон потужностей, значний термін дії.

До **недоліків** ламп відносять: миготіння лампи, наявність ПРА, залежність світлового потоку від розташування лампи, відносно високу вартість.

Лампа типу МГЛ або ДРІ (дугова ртутна з випромінювальними домішками) за конструкцією подібна до ламп ДРЛ, однак вона не має люмінофорного покриття і додаткових електродів, які її запалюють. Запалювання лампи відбувається при імпульсній напрузі 2–6 кВ, розпалюються лампи трохи швидше, ніж лампи ДРЛ. Спектр випромінювання ламп забезпечує високу якість передачі кольору, вищий світловий ККД порівняно з лампами ДРЛ.

Коефіцієнт пульсації ламп типу ДРІ становить 20–30 %, світлова віддача 70–95 лм/Вт. При горизонтальному розташуванні ламп їх світловий потік на 15–18 % нижчий, ніж при вертикальному. Діапазон потужностей – 250–3 500 Вт, лампи потужністю 2 000 Вт і більше вмикаються на напругу 380 В. Термін дії ламп – 5 000–10 000 год, кращі зразки зарубіжних фірм – до 20 000 годин.

МГЛ застосовуються для освітлення виробничих приміщень, великих спортивних споруд, для архітектурно-художнього освітлення будинків, для освітлення при кінозйомках і телепередачах.

Натрієві лампи високого тиску

Натрієві лампи високого тиску (далі – ДНаТ) – одне з найефективніших джерел видимого випромінювання: найвища світловіддача в групі ГЛ і незначне зменшення світлового потоку при тривалому терміні дії.

У натрієвих лампах, конструкція яких подана на рисунку 2.16, використовується резонансне випромінювання D-ліній натрію 589 і 589,6 нм,

що забезпечує їхню високу світловіддачу. **Перевагами** ламп, крім найвищої світловіддачі, є висока стабільність світлового потоку, незалежність світлового потоку від відхилень напруги, відсутність люмінофорного покриття, значний термін дії. До **недоліків** ламп відносять їх найнижчу серед усіх ламп передачу кольору, високий коефіцієнт пульсації, наявність ПРА. Усі лампи застосовуються здебільшого для освітлення площ, парків, вуличного освітлення.

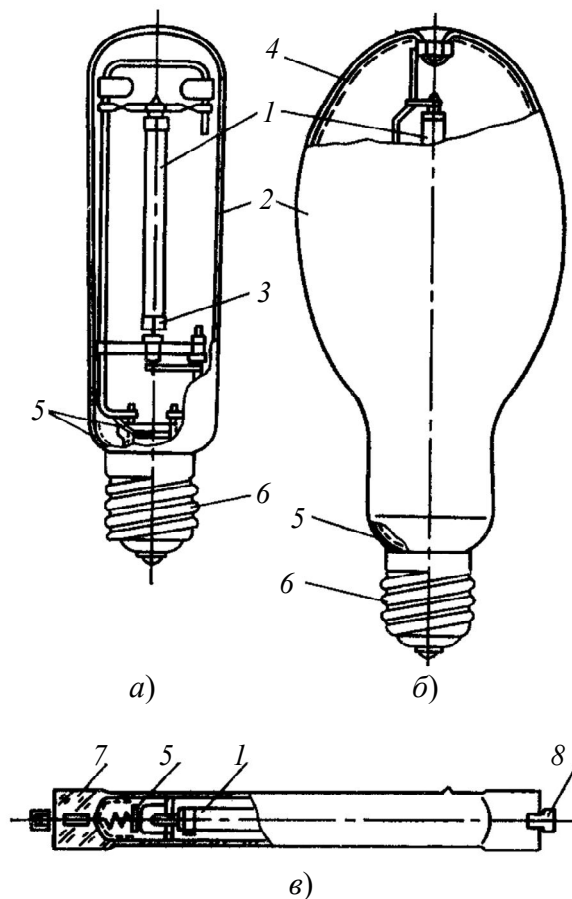


Рисунок 2.16 – Загальний вигляд натрієвих ламп високого тиску:
 а) – у прозорій колбі (типу ДНаТ); б) – у світлорозсіювальній колбі (типу ДНаТМт); в) – у софїтному виконанні (типу ДНаТсф);
 1 – розрядна трубка; 2 – скляна зовнішня колба; 3 – тепловідбивний екран;
 4 – світлорозсіювальне покриття; 5 – барієвий газопоглинач; 6 – цоколь різьбовий; 7 – кварцова зовнішня колба; 8 – цоколь спеціальний

Розрізняють натрієві ДС двох видів: низького тиску (далі – НЛНТ) і високого (далі – НЛВТ).

НЛНТ – це розрядні трубки з діаметром 15–25 мм, і виготовляють зі спеціальних сортів скла, стійких до впливу розряду в парах натрію. У натрієвих лампах низького тиску (0,2–1,2 Па) розряд протікає в парах інертних газів і парах натрію. Електроди оксидні, спіральні. Напруга запалювання – 500 В, час

розгорання – 15 хв, пульсація світлового потоку майже – 100 %, вони характеризуються нечутливістю до температури навколишнього середовища. Світлова віддача ламп становить близько 180 лм/Вт. Жовте монохромне світло забезпечує хорошу видимість при поганій освітленості та в тумані. Такі лампи використовуються для освітлення автострад, тунелів, майданчиків товарних станцій тощо, а також як архітектурне і декоративне освітлення.

У натрієвих лампах високого тиску пальник заповнений сумішшю парів натрію (Na), ртуті (Hg) і ксенону (Xe), які перебувають під високим тиском.

Натрій – джерело випромінювання електронів та іонів. Ртуть – буферний газ для підвищення температури розряду й зменшення теплових витрат. Ксенон – запалювальний газ, він збільшує світлову віддачу внаслідок зниження теплопровідності плазми.

При високому тиску (4–14 кПа) резонансні лінії натрію розширюються зі зміною кольору випромінювання в бік сонячного світла (час розгорання до 7 хв). Лампа запалюється від імпульсного джерела високої напруги близько 2 500 В. Час повторного запалювання згаслої лампи – до 3 хвилин. Колір випромінювання – золотисто-білий ($T_k = 2\ 100\text{ K}$). Колірну температуру можна підвищити, збільшивши тиск парів натрію, але в цьому разі знизиться світлова віддача.

Матеріалом пальника є кераміка, яка стійка до тривалої дії парів натрію при $T = 1\ 600\text{ }^\circ\text{C}$, а загальний коефіцієнт пропускання видимого випромінювання – до 95 %. Зовнішня колба вакуумована, тиск у 0,01 Па підтримується газопоглиначем.

Коефіцієнт пульсації ламп типу ДНаТ (дугові натрієві трубчасті) становить 82 %, світлова віддача – 100–170 лм/Вт, за конструкцією вони подібні до ламп МГЛ.

Корисний термін дії натрієвих ламп становить 10 000–15 000 годин. Для натрієвих ламп характерна стабільність світлового потоку в часі. Приміром, за 10 000 год експлуатації їхній світловий потік знижується на 15–20 %. Відхилення напруги практично не впливають на світловий потік ламп.

Спектр видимого випромінювання міститься в зоні жовто-червоного кольору, тому ці лампи не придатні для освітлення приміщень, де виконується зорова робота. Значний світловий потік і викривлення спектра випромінювання натрієвих ламп спричиняють сліпучу дію, дискомфорт, а отже, людина швидко втомлюється, її працездатність знижується.

Натрієві лампи типу ДНаТ для внутрішнього освітлення застосовуються зрідка, зважаючи на значні пульсації випромінюваного світлового потоку, а також високий рівень УФ випромінювання. Їх потрібно використовувати винятково з дозволу органів санітарного нагляду за умови, що освітленість у

зоні перебування людей не перевищує 150 лк. Використовуються лампи для освітлення вулиць, площ і великих відкритих просторів.

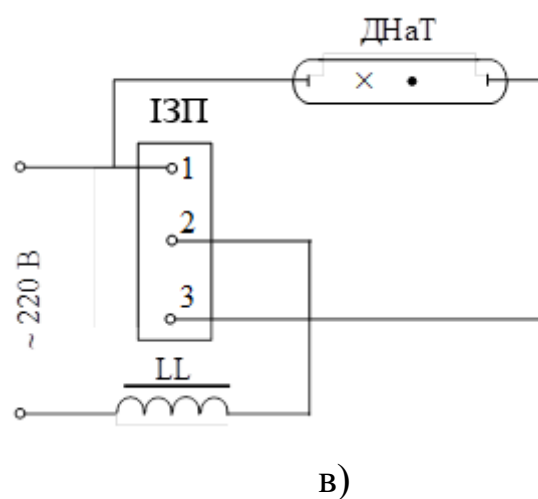
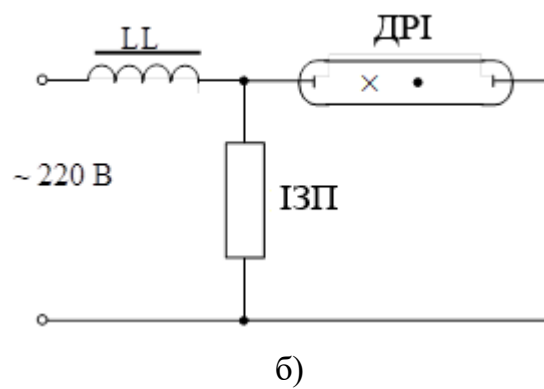
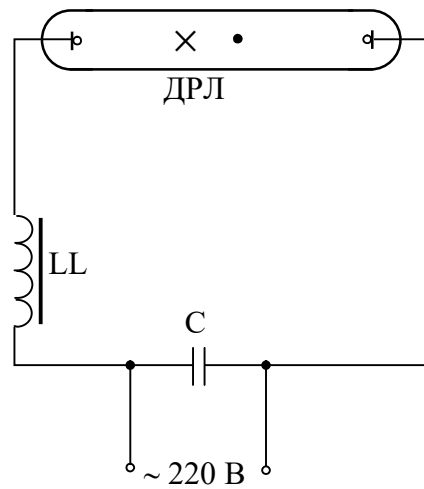


Рисунок 2.17 – Схеми підімкнення різних типів розрядних ламп високого тиску до мережі: а) – ДРЛ, б) – ДРІ, в) – ДНаТ

Запалювання натрієвих ламп здійснюється спеціальним пристроєм, що подає на лампу високочастотний імпульс з амплітудою 2–4 кВ. Час розгорання лампи – 5–7 хв визначається швидкістю її нагрівання і випаровування натрію і ртуті. У міру розгорання спектр випромінювання змінюється з монохромного жовтого на нормальний розширений, що відповідає сталим робочим параметрам. Час повторного запалювання лампи визначається часом охолодження розрядної трубки до температури, при якій подаються імпульси напруги, достатні для повторного запалювання розряду, він становить 2–3 хв.

На рисунку 2.17 наведено електричні схеми підімкнення розрядних ламп типу ДРЛ, ДРІ, ДНаТ до мережі.

2.5 Інші розрядні лампи

Імпульсні лампи

Імпульсні лампи (далі – ІЛ) – це газорозрядні лампи, розраховані на потужні імпульсні електричні розряди, що супроводжуються інтенсивним оптичним випромінюванням. Лампи мають герметичний балон зі скла або кварцу, наповнений хімічно неактивним газом. Запалювання ІЛ здійснюється за допомогою третього, розташованого усередині або на поверхні лампи, керівного електрода з подачею високовольтного імпульсу. У деяких випадках ІЛ не має керівного електрода і запалюється шляхом короткочасного збільшення напруги на базових електродах. Схеми ввімкнення ІЛ містять накопичувач, що заряджається від джерела постійного струму, і пристрої управління, синхронізації та захисту, що регулюють роботу зарядного пристрою, генератора запалювання імпульсів і розрядного контуру.

За конструктивними ознаками можна виокремити трубчасті й кульові ІЛ. Характеристики випромінювання кульових ІЛ відрізняються особливостями зумовленими істотно меншою тривалістю та формою каналу розряду, що світиться та змінюється від імпульсу до імпульсу в необмеженій стінками розрядному проміжку невеликої довжини. Здебільшого вони призначені для оптичного накачування лазерів.

Додаткові параметри ламп:

t_{in} – інтервал часу між спалахами;

t_{max} – максимальна тривалість безперервної роботи;

$P_{сер} = W_{pf}$ – середня електрична потужність;

f_{max} – найбільша частота спалахів;

N – кількість спалахів за термін дії.

Лампи-спалахи одноразової дії

Лампи-спалахи одноразової дії (далі – ЛС) створюють імпульс випромінювання внаслідок реакції горіння магнієвої або цирконієвої фольги в кисні. Міжнародними стандартами встановлено конструкцію, класифікацію, світлові параметри й методи вимірювання параметрів ЛС для фотографування. Ефективна тривалість спалаху фотографічних ламп міститься в межах 10 і 30 мкс. Промисловість випускає фотографічний спалах-куб, що складається з чотирьох ЛС, розміщених за гранями прозорого пластмасового куба.

Лампи тліючого свічення

Лампи тліючого свічення (далі – ЛТС) призначені для використання, головно як індикатори. Крім того, їх застосовують як спеціальні. Пристрій і принцип їхньої дії базуються на використанні катодного тліючого свічення. У скляний балон лампи впаяні два електроди, розташовані на невеликій відстані один від одного. Лампа зазвичай наповнюється неон-гелієвою сумішшю з невеликою домішкою аргону для зменшення напруги запалювання. Форма електродів обумовлюється призначенням ЛТС. Зазвичай електроди вкриваються тонкою плівкою активуючої речовини, що зменшує напругу запалювання. При роботі на змінному струмі свічення попеременно вкриває обидва електроди (із частотою мережі). Випромінювання різниться невеликою інерційністю і може модулюватися з частотою до 20–22 кГц. Світловий потік ЛТС залежно від типу лампи становить від 0,02 до 5 лм, яскравість свічення – від 102 до 104 кд/м², світлова віддача – від 0,2 до 1 лм/Вт, потужність ЛТС – від 0,01 до 10 Вт. Термін дії ЛТС – понад 1 000 год, він обмежується поглинанням наповнювального газу і потемнінням колби внаслідок розпилення електродів. Підімкнення ламп до мережі здійснюється через невеликий резистор, що послідовно з'єднується з лампою.

Спектральні лампи

Спектральні лампи (далі – СЛ) слугують джерелами випромінювання з чітко визначеними довжинами хвиль або з безперервним спектром із відомою спектральною щільністю потоку випромінювання. За пристроєм і принципом дії спектральні лампи поділяються на кілька груп:

1. *Лампи дугового розряду* з парами металів та інертними газами містять випромінювач у вигляді невеликої розрядної трубки, наповненої сумішшю парів будь-якого металу із запальним газом і будь-яким металом або інертним

газом. Випромінювач розміщений у зовнішній скляній колбі, обладнаній цоколем. Розміри трубки випромінювача і сорт скла обираються на підставі наповнення і теплового режиму з таким розрахунком, щоб забезпечити інтенсивне випромінювання ліній металу, необхідний електричний режим і достатній термін дії. Лампи випромінюють лінійчасті спектри, характерні для атомів металу або газу, що наповнюють пальник.

2. *Дугові низьковольтні водневі лампи* забезпечують безперервне інтенсивне випромінювання в області близькій до УФ. У деяких лампах застосовуються активований підігрівний катод, укладений в циліндр, що екранує, і анод у вигляді диска з отвором для спостереження розряду. Простір між катодом і анодом відокремлено екраном з невеликим отвором (близько 1-2 мм) для виникнення розряду. Концентрація плазми в малому отворі підвищує щільність струму і енергетичну яскравість випромінювання. Колба лампи має спеціальне вікно, що забезпечує вихід УФ-випромінювання. Лампа має плоске вікно з монокристала фтористого магнію, яке розташоване на торчаку колби. Така конструкція уможливує вакуумно-щільне приєднання лампи за допомогою грибового ущільнення до камери спектрального приладу для безпосереднього потрапляння випромінювання у вакуум приладу. У лампах з парами металів сталий режим встановлюється через 7–10 хв після ввімкнення. У лампах із газами період розгорання практично відсутній.

3. *Високочастотні безелектродні лампи типу ВСБ-2* становлять скляну колбу сферичної форми з діаметром 20 мм, наповнену інертним газом при тиску в кілька сот паскалів, що містить невелику кількість металу. Лампа розміщується у високочастотному полі (≈ 100 МГц), що створюється генератором, і випромінює при цьому вузькі спектральні лінії відповідного металу. Лампи використовуються в атомно-абсорбційних, атомно-флюоресцентних спектрофотометрах, рефрактометрах і подібних до них приладах.

4. *Неонові дугові лампи* – ефективне і потужне джерело оранжево-червоного випромінювання. Лампа працює від мережі 220 В (частота 50 Гц) і вмикається послідовно з дроселем. Для запалювання застосовано попереднє розжарення активованих електродів у поєднанні з імпульсом високої напруги за схемою, подібною до схеми підімкнення ЛЛ зі стартером. З цією метою обидва кінці у кожного електрода виведені. Середня тривалість горіння – 1 000 годин. Лампи надійно працюють при $t_{навк}$ від -40 до +40 °С і застосовуються, головне, для сигнального освітлення аеродромів.

Електролюмінесцентні панелі

Електролюмінесцентна панель (далі – ЕЛП) становить плоский конденсатор, в електричному полі якого розміщений люмінофор. Електролюмінесценція збуджується при напруженості поля близько 104–105 В/см. Плоскопаралельні обкладки електролюмінесцентного конденсатора розміщуються на відстані декількох десятків мікрометрів одна від одної. Простір між ними заповнений прозорим діелектриком, у якому зважені частинки люмінофора. Одна або обидві обкладки виготовляються прозорими, зазвичай зі скла (іноді на кераміці) або на гнучкій основі. В останньому випадку ЕЛП легко згинаються. Стандартні ЕЛП на склі призначені для роботи від мережі 220 В на частотах 50, 400, 1 000 і 1 200 Гц і виглядають як прямокутні пластини з розміром від 10 × 20 до 300 × 300 мм² завтовшки 4–5 мм. Як люмінофори застосовують сульфід цинку і селенід цинку або кадмію. За необхідності ЕЛП можуть мати форму простих або складних знаків. Сфера застосування – у знаках, що світяться для систем сигналізації та відображення інформації, а також як малопотужні джерела випромінювання різного призначення.

Індукційні люмінесцентні лампи

Дев'яності роки минулого століття ознаменувалися епохальною подією в концепції розвитку ЛЛ. Лідерами у сфері виробництва і розробки світлотехнічних виробів та систем – фірмами «Philips Lighting», «General Electric Lighting» і «Osram» – були розроблені і впроваджені у виробництво безелектродні індукційні люмінесцентні лампи (далі – ІЛЛ).

В цих лампах, як і в інших ЛЛ, для свічіння люмінофорів використовується газовий розряд у парах ртуті та інертного газу (аргон або криптон). Якщо у звичайній ЛЛ електричний струм утворює стовп розряду між розігрітими електродами, то в індукційній (безелектродній) високочастотний газовий розряд створюється електромагнітним полем. Розряд підтримується за допомогою енергії електромагнітного поля, яке створюється поблизу розрядного об'єму. Безелектродні ІЛЛ розпочали створювати завдяки успіхам напівпровідникової електроніки, зокрема розроблення малогабаритних і порівняно дешевих джерел високочастотної (далі – ВЧ) енергії зі значним ККД. Усі можливі типи безелектродних ІЛЛ складаються з трьох головних вузлів:

- малогабаритного джерела ВЧ-енергії;
- пристрою для ефективної передачі ВЧ-енергії до індуктора;
- розрядного об'єму.

Робота ІЛ базується на трьох головних принципах:

– емнісного розряду (Є-розряд) – герметична розрядна колба розміщується між двома металевими пластинами (аналог конденсатора), на які подається напруга ВЧ. Характеризується низькою ефективністю розряду і швидким зношуванням люмінофора;

– мікрохвильової плазми (СВЧ-розряд) – застосовується джерело СВЧ (кілька ГГц), характеризується великими габаритами виробу і значною вартістю;

– індукційного розряду (І-розряд) – індукційна котушка охоплює розрядну трубку або розміщується всередині неї. Змінний магнітний потік котушки створює електричне поле, що підтримує плазму розряду. Цей принцип найоптимальніший для розроблення ІЛ освітлювальних установок.

Переваги ІЛ: різноманітність видів джерела світла, широкий діапазон світлового потоку, відсутність електродів, значний термін дії, незалежність терміну дії від кількості циклів «увімкнення-вимкнення», миттєве запалювання, відсутність миготіння під час роботи.

Недоліки ІЛ: великі розміри розрядної трубки, обмежений діапазон потужності, низький світловий потік ($\Phi_{max} = 12\,000$ лм), чутливість до температури навколишнього середовища, нестандартні характеристики ламп, різне конструктивне виконання різними виробниками, значна вартість комплекту «Лампа-ЕПРА».

Відомо п'ять видів безелектродних ламп, серед яких розглянемо тільки перший:

- ртутні індукційні люмінесцентні лампи; найбільш освоєні із них:
- типу «QL» фірми «Philips» (Нідерланди), типу «Endura» фірми «Osram» (Німеччина),
- типу «Genura» фірми «General Electric» (США);
- мікрохвильові (СВЧ), сірчані;
- фосфоресцюючі;
- радіоактивного принципу дії;
- біоактивного принципу дії.

Перші серійні зразки безелектродних ІЛЛ були випущені компанією «Philips» у 1991–1992 рр. під торговою маркою «QL» (Quality Lighting). Конструктивне виконання сучасної безелектродної індукційної лампи типу «QL» (фірми «Philips») подано на рисунку 2.18.

Ці люмінесцентні джерела світла за формою максимально наближені до ЛР загального призначення. Колба лампи має циліндричне заглиблення для

розміщення індуктора, усередині вона вкрита люмінофором і наповнена інертним газом з невеликою кількістю ртуті у вигляді амальгами. Індуктор (соленоїд) з феритовим осердям, на який надіта колба, забезпечує індуктивність вихідного контуру транзисторного ВЧ-генератора і з'єднаний із ним через коаксиальний кабель для зменшення втрат на ВЧ-випромінювання. Електромагнітне поле індуктора на частоті 2,65 МГц створює розряд у парах ртуті з УФ-випромінюванням, яке впливає на люмінофорне покриття з трикомпонентної суміші гексагональних алюмінатів, активованих рідкоземельними елементами, а люмінофор, зі свого боку, випромінює видиме світло.

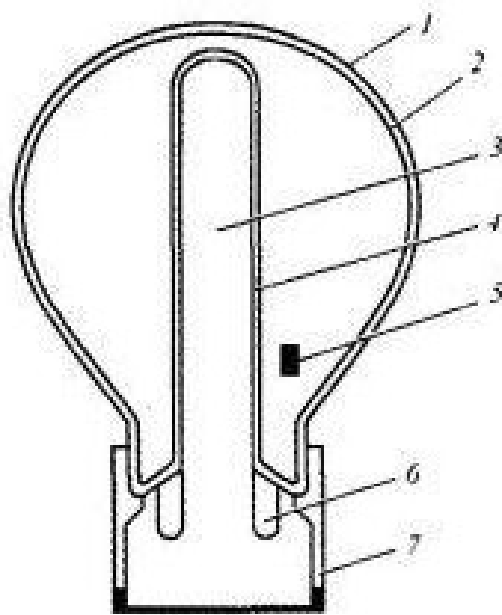


Рисунок 2.18 – Конструкція ІЛ типу «QL»:

- 1 – колба; 2 – шар люмінофора; 3 – порожнина для індуктора; 4 – ніжка;
 5 – капсула з амальгамою на ніжці; 6 – базова капсула з амальгамою;
 7 – лампотримач

Основні елементи індукційної лампи:

- колба (1) для створення об'ємного газового розряду;
- шар люмінофора (2), що наноситься на внутрішню поверхню колби для перетворення невидимого УФ випромінювання на видиме;
- порожнина індуктора (3) для розміщення джерела електромагнітного поля;
- ніжка (4) – межа порожнини феритового осердя;
- капсула з амальгамою (5) на ніжці (допоміжна) ;

- базова капсула з амальгамою (6) для створення умов виходу лампи в робочий режим і забезпечення стабільності роботи;
 - лампотримач (7) для кріплення в світильнику.
- Принцип дії ІЛ пояснено на рисунку 2.19.

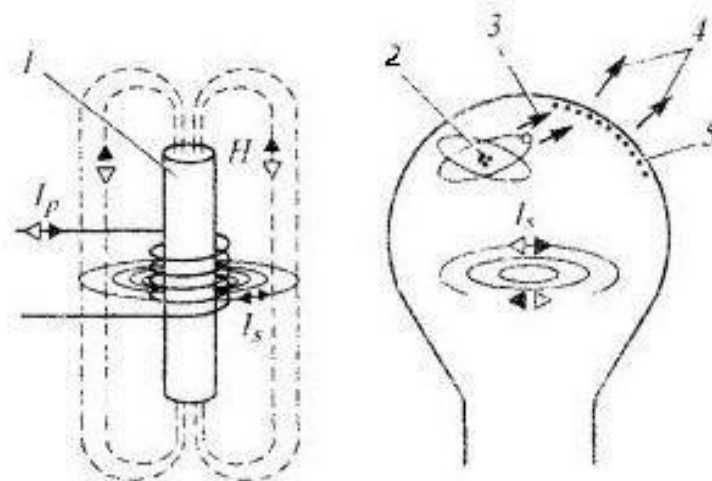


Рисунок 2.19 – Принцип дії індукційної лампи:

- 1 – феритове осердя; 2 – атом ртуті; 3 – ультрафіолетове випромінювання;
4 – видиме світло; 5 – люмінофорне покриття

Для запуску лампи формується запалювальний імпульс з напругою близько 1 300 В і тривалістю 15 мс. Індуктор (феритове осердя з обмоткою) аналогічний до первинної обмотки трансформатора, по якій надходить струм (I_p). Роль вторинної обмотки виконує розряд у парах ртуті низького тиску. Створюване індуктором електромагнітне поле (I_s) високої частоти забезпечує газовий розряд у парах ртуті. Виникає УФ випромінювання, яке люмінофорне покриття перетворює на видиме світло.

Час повного розгорання розряду – близько 1 хв. Люмінофор і скло захищені від ртутного забруднення захисною плівкою (як і в ІЛ типу Т5), що забезпечує зниження світлового потоку менше 10 % після 10–20 тис. год і 25 % – після 60 тис. год роботи лампи (рис. 2.20).

Унаслідок значного терміну дії ІІЛ становить ідеальне джерело світла для освітлення цехів з безперервним режимом роботи і у випадках, коли доступ до світильників при обслуговуванні ускладнений, наприклад, у разі значної висоти установки (стелі) і захищеності зон підходу, а також там, де заміна ламп пов'язана зі значними матеріальними витратами.

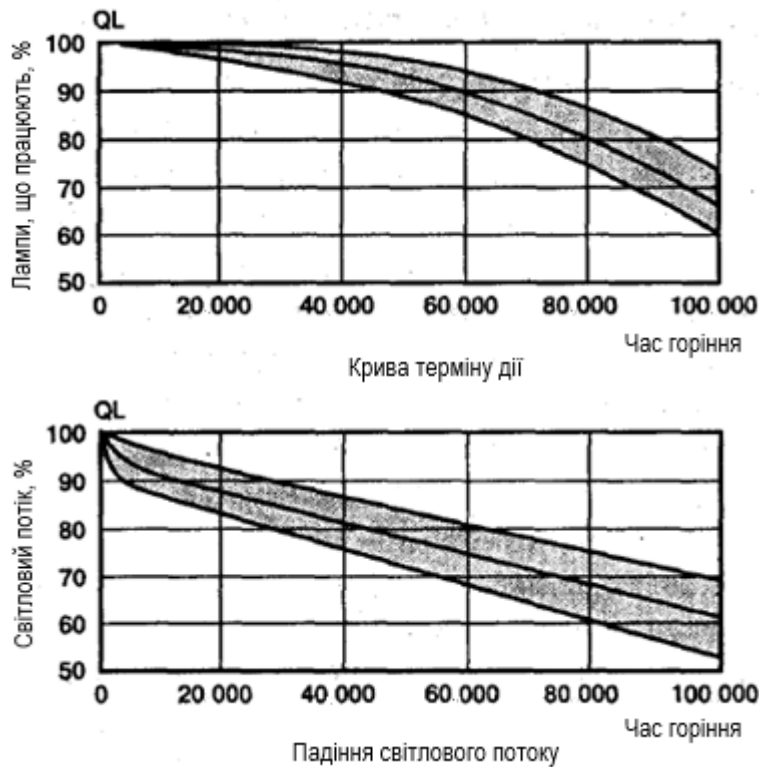


Рисунок 2.20 – Експлуатаційні характеристики лампи типу «QL»

Уперше лампи типу «QL» із потужністю 85 Вт були використані в світильниках, виготовлених, як газові ліхтарі і встановлених на одному з майданів Парижа, а також в пішохідній частині Єлисейських полів. Лампи «QL» із потужністю 55 Вт були вперше використані в установках із порожніми протяжними світловодами в парапетній системі освітлення пішохідних і велосипедних доріжок нового моста в м. Гроннінгене (Голландія). Відомо багато прикладів застосування ламп типу «QL» в установках зовнішнього та внутрішнього освітлення: серед них підсвічування годинника на вежі Біг Бен, освітлення Палати лордів в Парламенті Великобританії, тунелю на автостраді між містами Веве і Монтре на березі Женевського озера, залізничного вокзалу для швидкісного експреса в Брюсселі, великих торгових центрів в Мадриді, Барселоні, Гамбурзі тощо. У цих освітлювальних приладах здебільшого використовувалися лампи «QL» із потужністю 165 Вт. Технічні характеристики ламп «QL» наведені в таблиці 2.2.

Наступним етапом розвитку ЛЛ було створення в 1994 році фірмою «GE Lighting» компактної лампи типу «Genura», у якій відповідно до досягнень сучасної мікроелектроніки ВЧ-генератор був розміщений в цоколі лампи. На відміну від «QL», «Genura» належить до групи компактних ЛЛ (ВЧ-генератор розміщується в цоколі лампи) і призначена для безпосередньої заміни стандартних ЛР.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики лампи «QL»

Параметр	QL 55W	QL 85W	QL 165W
Потужність системи «QL», Вт	55	85	165
Світловий потік, лм	3 500	6 000	12 000
Світлова віддача, лм/Вт	65	72	73
Колірна температура випромінювання, К	2 700	2 700	-
	3 000	3 000	3 000
	4 000	4 000	4 000
Індекс передачі кольору, R_a	більше 80	більше 80	більше 80
Максимальний час розгорання та перерозгорання, с	0,5	0,5	0,5
Діапазон робочих температур навколишнього середовища (у зачищеному світильнику), °С	від -20 до +65	від -20 до +65	від -20 до +65

Заміна ЛР лампою «Genuga» забезпечує економію електроенергії в 4–5 разів більше і підвищує тривалість експлуатації в 10–15 разів. Фірма «GE Lighting», посилаючись на стандарт «IEC 969», заявила, що гарантований термін дії лампи «Genuga» становить 15 000 годин.

За формою колби і габаритними розмірами лампа «Genuga R80» відповідає дзеркальній ЛР типу R80 (100 Вт). У прицокольній частині лампи розміщений транзисторний генератор із частотою 2,5 МГц, що споживає 23 Вт від мережі змінного струму з напругою 230 В. Колба лампи «Genuga» вкрита зсередини люмінофором і наповнена ксеноном з невеликою кількістю ртуті. Внутрішня будова лампи «Genuga» зображена на рисунку 2.21.

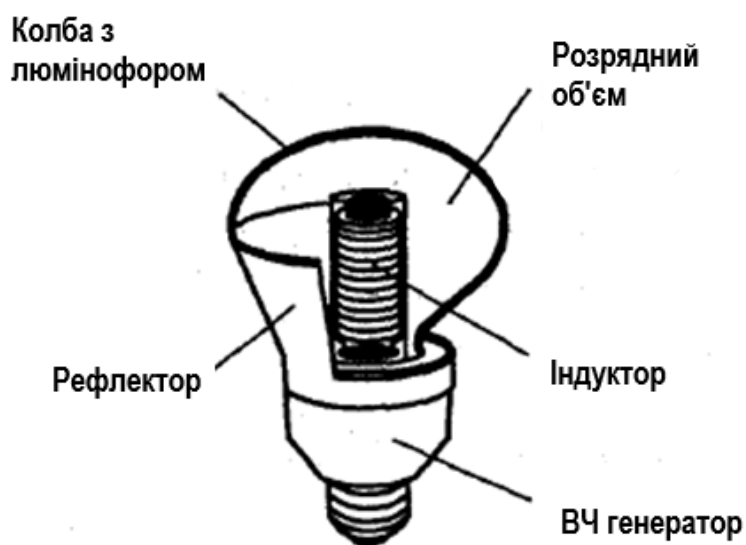


Рисунок 2.21 – Внутрішня будова лампи «Genuga»

Розташування індуктора з феритовим осердям всередині колби лампи відповідає конструкції безелектродної ІЛ типу «QL». Та обставина, що ВЧ-генератор міститься в самій лампі, обмежує її потужність і термін дії, який здебільшого визначається тепловою і радіаційною стійкістю транзисторного генератора.

Екрануюча дія слабого ВЧ-розряду мабуть вважається недостатньою, і з метою зниження рівня електромагнітних випромінювань від індуктора на поверхні колби під шаром люмінофора нанесено провідне покриття з тонкої плівки окису цинку. ІЛ типу «Genura» забезпечена рефлектором із білого поліпропілену, що зберігає свою форму при змінюванні температури від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Технічні характеристики ІЛ «Genura» наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики ІЛ «Genura»

Параметри	Значення
Потужність лампи, Вт	23
Струм, А	0,21
Світловий потік, лм	1 100
Світлова віддача, лм/Вт	48
Колірна температура випромінювання, К	2 700
	3 000
Індекс передачі кольору, R_a	82
Максимальна припустима температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$	-20
Маса лампи, г	200
Цоколь	E27

В кінці 1990-х років фірма «Osram» розробила і освоїла випуск своєї оригінальної безелектродної ІЛЛ, яка отримала назву «Endura». Конструкція цієї лампи вирізняється тим, що індуктор розташовується поза колбою. Колба лампи «Endura» становить замкнуту трубку, вигнуту у вигляді заокругленого по кутах прямокутника. У коротких ділянках прямокутника розташовані два індуктори з феритовими кільцями. На рисунку 2.22 зображено будову лампи «Endura».

Такий пристрій допускає значне збільшення потужності і зниження частоти електромагнітних коливань, що збуджують розряд у лампах «Endura», порівняно з ІЛ, в яких індуктор розташовується всередині колби лампи. Частота струму, що надходить на індуктор від ВЧ-генератора «Quicktronic» становить усього 250 кГц.

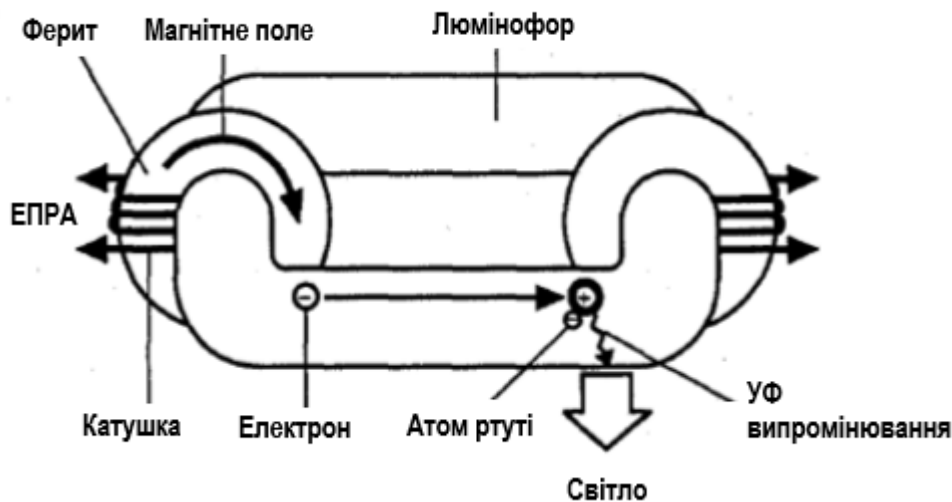


Рисунок 2.22 – Будова лампи «Endura»

Використання сталих вузькосмугових люмінофорів уможливило істотне збільшення питомого навантаження і зменшення габаритів ламп «Endura», а використання амальгами ртуті призвело до зменшення залежності світлового потоку від температури. Досягнуті потужності не граничні. Однак збільшення потужності лампи до 150–200 Вт і вище обмежується в цій конструкції рівнями електромагнітного випромінювання, для їхнього зниження необхідні спеціальні екрани. Конструкція лампи «Endura» зручна для використання в плоских світильниках, у яких також розміщуються і компактні генератори «Quicktronic», що працюють на частоті 250 кГц. У рекламних проспектах фірми «Osram» зазначається, що світловий потік ламп «Endura» зберігається незмінним у широкому інтервалі температур. Вони гарантовано запалюються при температурі до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, забезпечують миттєве повторне запалювання майже на повній потужності і характеризуються хорошою комутаційною здатністю. Їхній термін дії становить 60 000 год і обмежується довговічністю електронних генераторів. Зазначені особливості ламп «Endura» уможливають їхнє використання в екстремальних умовах експлуатації. У таблиці 2.4 наведено технічні характеристики ламп «Endura».

Лампа «Endura» розроблена спеціально для таких сфер застосування, у яких заміна ламп становить дуже трудомісткий процес, наприклад, у зовнішньому освітленні, для промислових цехів з високими стелями або систем освітлення в тунелях.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики ламп «Endura»

Параметри		«Endura» 75W	«Endura» 100W	«Endura» 150W
Потужність системи «Endura», Вт		75	100	150
Світловий потік, лм		6 500	8 000	12 000
Світлова віддача, лм/Вт		80	80	80
Колірна температура випромінювання, К		3 000	3 000	3 000
		4 000	4 000	4 000
Індекс передачі кольору, R _a		більше 80	більше 80	більше 80
Струм від мережі 220 В, А		0,4	0,64	0,7
Діапазон робочих температур навколишнього середовища (у зачиненому світильнику), °С		від -25 до +50	від -25 до +50	від -25 до +50
Габаритні розміри	Колби	L = 313 мм, B = 139 мм, H = 72 мм	L = 313 мм, B = 139 мм, H = 72 мм	L = 414 мм, B = 139 мм, H = 72 мм
	«Quicktronic» S-виконання	L = 181 мм B = 99 мм H = 42 мм		
	«Quicktronic» L-виконання	L = 423 мм B = 40 мм H = 30 мм		

Контрольні питання до розділу 2

1. Конструкція ЛЛ низького тиску, принцип її роботи та сфера застосування.
2. Роль люмінофору в ЛЛ.
3. Роль інертного газу в ЛЛ.
4. Які види розрядів виникають в ЛЛ низького тиску? Охарактеризуйте ці види розряду.
5. Поясніть механізм виникнення розряду в ЛЛ.
6. Конструкція електродів ЛЛ.
7. Яку роль відіграє ртуть у ЛЛ?
8. Що таке резонансне випромінювання?
9. Як і чому температура колби впливає на параметри ламп?
10. Назвіть параметри сучасних ЛЛ?
11. Конструкція лампи високого тиску типу ДРЛ, принцип її роботи та сфера застосування.
12. Конструкція лампи високого тиску типу МГЛ, принцип її роботи та сфера застосування.
13. Конструкція лампи високого тиску типу ДНаТ, принцип її роботи та сфера застосування.
14. Порівняйте випромінювальні речовини в лампах типу ДРЛ, МГЛ і ДНаТ.
15. Для чого призначена зовнішня колба ламп?

16. Вимоги щодо матеріалу пальника в лампах ДРЛ, МГЛ і ДНаТ.
17. Чим пояснюється наявність часу розгорання в лампах ДРЛ, МГЛ, ДНаТ і часу повторного розгорання?
18. Особливості спектру випромінювання розрядних джерел світла.
19. Чим відрізняється спектр випромінювання розрядних ламп низького і високого тиску?
20. Як визначити спектр випромінювання ламп різних типів – ЛЛ, ДРЛ, МГЛ, ДНаТ? Охарактеризуйте ці спектри.
21. Конструкція ІЛ, принцип їх роботи та сфера застосування.

3 СВІТЛОДІОДНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

3.1 Історія винаходу

Світлодіоди (англійське скорочення – LED, Light Emitting Diodes) – це напівпровідникові прилади, які під час проходження струму випромінюють світло [9–12].

Американський інженер Генрі Джозеф Раунд вперше спостерігав блакитнувате свічення напівпровідника – карбїду кремнію (SiC) при проходженні струму через точковий контакт у 1907 році.

О. В. Лосєв досліджував детектори радіоприймачів із SiC у Нижегородській лабораторії у 20-ті роки минулого сторіччя. Він виявив випромінювання у контактах як при прямій, так і при зворотній напрузі і довів, що воно не пов'язане з нагріванням напівпровідника. За О. В. Лосєвим, найяскравіше свічення спостерігається у напівпровіднику поблизу межі зон з дірковою (p-) і електронною (n-) провідністю. Цей ефект у європейській літературі отримав назву «ефект Лосєва».

Дослідження електронно-діркових (p-n) переходів у напівпровідниках германію (Ge) та кремнію (Si) (починаючи з 1949 р.) стали базовими для технологічної революції і створення напівпровідникової електроніки (Нобелівська премія Дж. Бардина, У. Браттейна та Шоклі у 1956 р.).

Зрозумівши, що можливе ефективне випромінювання в діодах з GaAs (арсенїду галію), дослідники розпочали пошуки видимого випромінювання. Перші червоні світлодіоди з арсенїду-фосфїду галію (GaAsP) були розроблені Ніком Холоньяк (який має українське коріння) в 1961 році, і фірма «General Electric» розпочала їх промисловий випуск. Однак вони були порівняно малоефективні.

Світлодіоди червоного, помаранчевого та жовто-зеленого кольору свічення в 1968–1990 рр. минулого століття широко застосовувалися в індикаторах і цифролітерних покажчиках, ручних годинниках, інформаційних стрічках у рекламі і на транспорті.

Завдяки появі яскравих світлодіодів, з випромінюванням у всій видимій області спектра виникли світлодіодні джерела білого світла. На початку XXI століття стало зрозуміло, що світлодіоди стануть новими, набагато ефективнішими джерелами світла, що в майбутньому вони замінять ЛР та ЛЛ. На рисунку 3.1 показано, як змінилася світлова віддача різних джерел світла з 1940 по 2010 роки. Червона точка – рекордне значення для білих світлодіодів в лабораторіях у 2011 році.

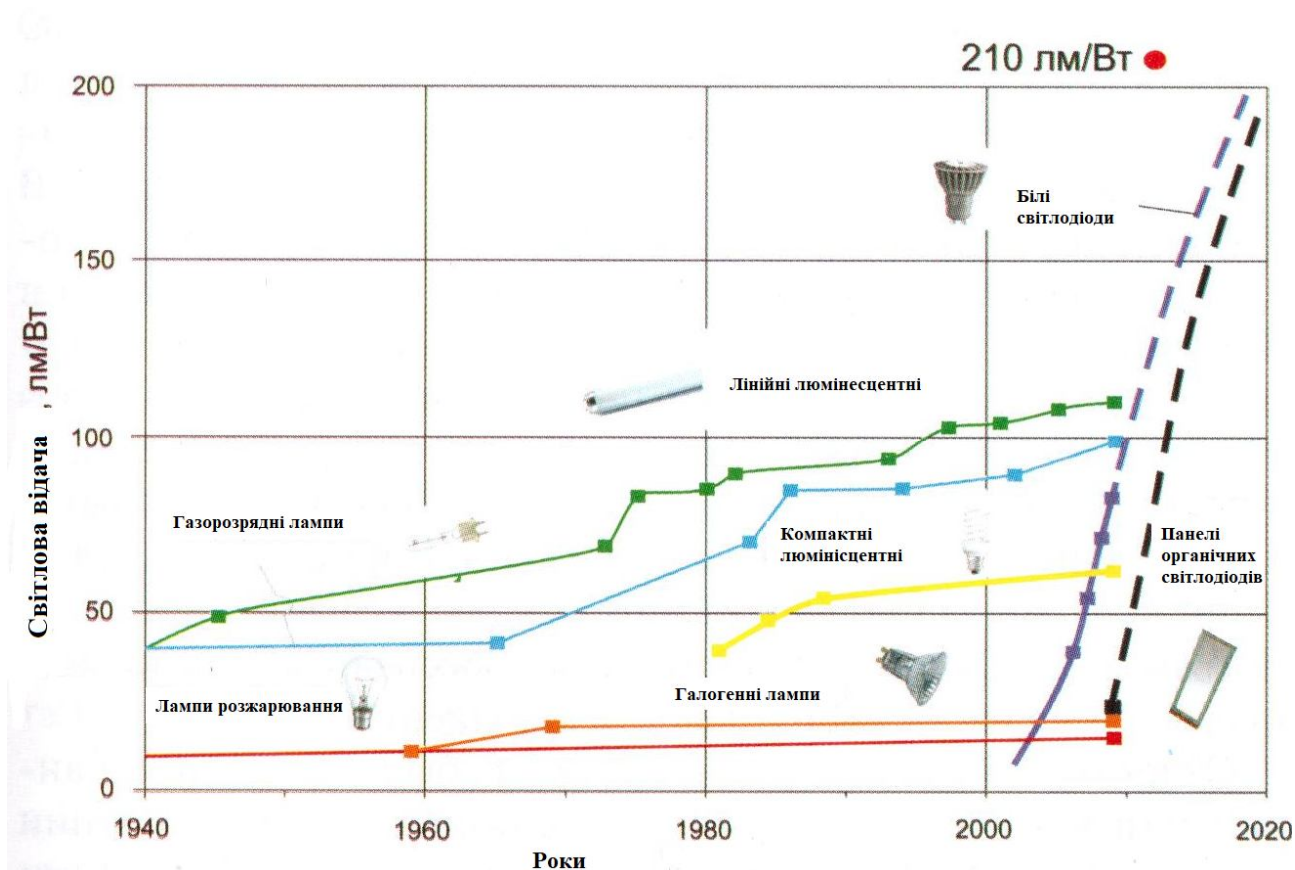


Рисунок 3.1 – Динаміка змінювання світлової віддачі різноманітних джерел світла в часі (з 1940 по 2010 рр.) і перспективи до 2020 р.

Виробництво світлодіодів і світлодіодне освітлення бурхливо розвивалися, випереджаючи сміливі прогнози фахівців. Було винайдено складні напівпровідникові структури з десятками шарів завтовшки нанометра, розроблено нові типи світлодіодів і світлодіодні лампи, з'ясовано їх сфери застосування. Паралельно з дослідженням світлодіодів із неорганічних напівпровідників досліджувалися і розроблялися органічні світлодіоди (OLED), які почали застосовуватися для освітлення.

Створення, розвиток і застосування освітлення, що базуються на використанні світлодіодів, має позитивні економічні й соціальні наслідки. Усвідомлення цього факту спричинило розроблення державних програм світлодіодного освітлення [9–12].

Перша державна програма «Освітлення XXI століття» була прийнята в Японії в 1998 році з бюджетом 41 млн доларів.

У 2002 році група вчених і інженерів Каліфорнії розробила американську програму (Solid Stated Lighting, SSL). Економічні перспективи світлодіодного освітлення були охарактеризовані так: «Якщо до 2020 р. буде замінено ЛР світлодіодами, отримана економія електроенергії буде еквівалентна можливості

відмовитися від будівництва 100 атомних електростанцій і скоротити викид продуктів згорання вуглеводнів на сотні мільйонів тон на рік».

Китай включив у першу п'ятирічку XXI століття розділ про світлодіоди тільки в 2004 році, але діяв так швидко й ефективно, що протягом наступної п'ятирічки (2006–2010 рр.) розвиток світлодіодної промисловості в Китаї дав йому змогу вийти на одне з перших місць у світі за обсягом продукції, що випускається світлотехнічною промисловістю зі світлодіодами.

Державна програма була прийнята і в Південній Кореї – у 2002 р. з бюджетом в 350 млн дол. на чотири роки.

У Європейському Союзі була прийнята програма «Фотоніка XXI століття», помітне місце у якій посідає програма світлодіодного освітлення.

В Україні – це «Національна програма створення світлодіодних джерел світла» 2009–2015 років.

2015 рік – Всесвітній рік світла і світлових технологій.

У 2015 році Нобелівська премія була присуджена японським фізикам за створення синіх світлодіодів.

Сотні мільйонів доларів, вкладені в дослідження і розроблення світлодіодів у Японії, США, Кореї, Китаї протягом перших років XXI століття, окупилися через 5–6 років. Ринок потужних світлодіодів досяг 1 млрд дол. у 2012 році, у 2020 – 2 млрд дол. і за прогнозами зросте до 6,5 млрд доларів.

3.2 Принцип дії світлодіода

Світловипромінювальні діоди (далі – СД) становлять мікромініатюрні напівпровідникові джерела світла, у яких випромінювання виникає на напівпровідниковому переході внаслідок рекомбінації електронів і «дірок». У світлодіодах використовуються напівпровідникові матеріали високої чистоти, леговані малими кількостями контрольованих домішок, що створюють або надлишок електронів (матеріал n-типу), або їх недолік, тобто надлишок «дірок», які поведуть себе подібно до позитивних зарядів (матеріал p-типу). У місці контакту матеріалів p- і n-типів утворюється напівпровідниковий **p-n-перехід**. Якщо до p-n-переходу прикласти постійну напругу в кілька вольт прямої полярності (до n-матеріалу мінус, а до p-матеріалу плюс), то прикладене поле буде змушувати переміщуватися електрони і «дірки» назустріч одне одному, і вони будуть рекомбінувати в зоні контакту, частково випромінюючи при цьому фотони.

Свічіння виникає на межі напівпровідників і виходить назовні у вигляді фотонів крізь один із матеріалів і через проміжок між ними.

Рекомбінація (в напівпровідниках) – це зникнення пари «електрон провідності – дірка» внаслідок переходу із зони провідності у валентну зону.

Електролюмінесценція – свічіння речовини при прикладанні різниці потенціалів і проходженні електричного струму.

Останнє явище і є базовим для СД. У разі проходження через них електричного струму в прямому напрямі носії заряду – електрони і дірки – рекомбінують із випромінюванням квантів світла – фотонів. Перетворення енергії відбувається внаслідок того, що в напівпровідникових діодах з р-п-переходами при проходженні струму збуджуються (інжектуються) електронно-діркові пари. Для відновлення рівноваги електрони й дірки рекомбінують, віддаючи частину енергії збудження фотонам. Випромінювальна рекомбінація в р-п-переходах також називається інжекційною електролюмінесценцією. Зазвичай випромінюване світло перебуває у вузькому діапазоні спектра, колір його свічіння визначається довжиною хвилі випромінювання, яка залежить від хімічного складу речовини напівпровідника. Спектр випромінювання залежить від матеріалу напівпровідника та домішок, що вводяться.

Схематичний вигляд СД з р-п-переходом подано на рисунку 3.2.

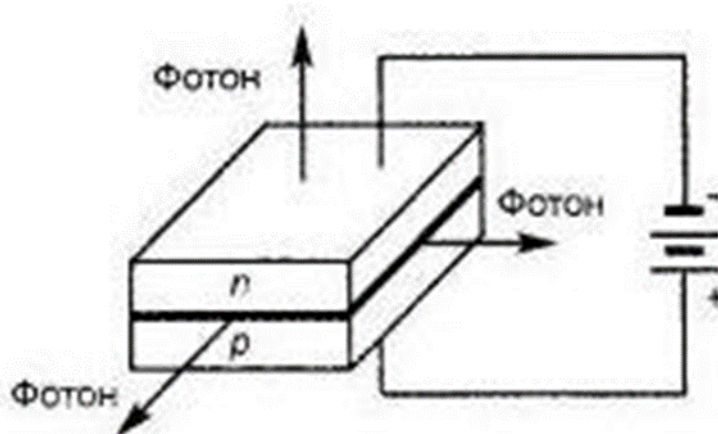


Рисунок 3.2 – Схематичний вигляд СД з р-п-переходом

Світлодіодні джерела світла складаються з таких елементів:

- випромінювального елемента (1) – напівпровідникового кристала р-п-переходу, укладеного в металевий корпус (4), скла (2) й ізолювальної основи (5);
- лінзи (3), що фокусує світло від кристала (1) і захищає кристал від вологи та корозії;
- контактів (6) та (7) для підімкнення до джерела постійного струму.

Типова конструкція СД представлена на рисунку 3.3.

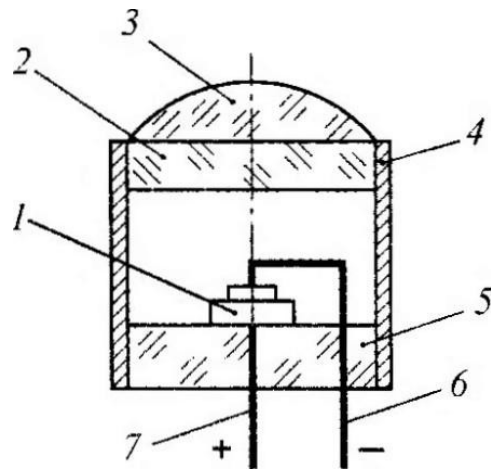


Рисунок 3.3 – Типова конструкція СД:

1 – випромінювальний елемент; 2 – скло; 3 – лінза; 4 – металевий корпус;
5 – ізолювальна основа; 6 – катод; 7 – анод

До катода (6) контакт приєднується шляхом зварювання, із застосуванням золотого дроту, а до анода – шляхом припаювання або застосування струмопровідного клею. Енергія, споживана СД, частково перетворюється на світло, а частково на тепло, нагріваючи його. Збільшення на переході температури понад 80 °С призводить до різкого зниження світлового потоку, що потребує тепловідведення. Однак змінювання температури на переході практично не впливає на довжину хвилі випромінювання.

Відведення тепла можна поліпшити трьома способами:

- збільшенням контактної площі, особливо поблизу анода;
- збільшенням відстаней між СД, розташованими на платі;
- хорошим тепловим контактом СД з платою.

На рисунку 3.4 зображені інші види конструкції СД.

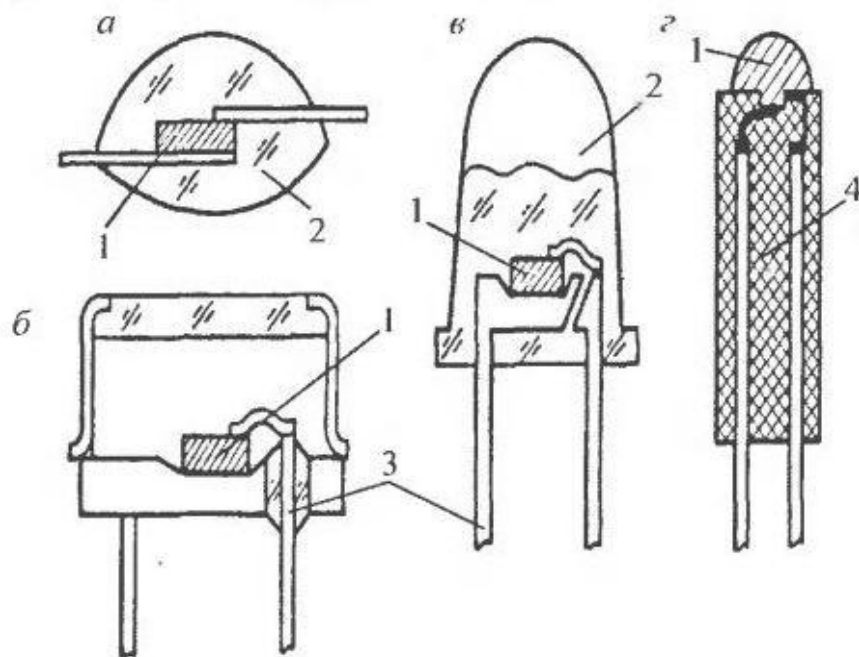


Рисунок 3.4 – Конструкції деяких видів світлодіодів:

а) – безкорпусний; б) – у металоскляному корпусі;

в) – з полімерною лінзою; г) – у полімерному корпусі;

1 – кристал; 2 – полімерний захист (лінза); 3 – ніжка; 4 – полімерний корпус

Позитивні характеристики світлодіодів:

– найменше, порівняно з будь-якими іншими типами ДС, споживання електроенергії – у 8–10 разів менше, ніж у ЛР;

– висока світлова віддача, близько 120 лм/Вт. Для порівняння світлова віддача ЛР – від 10 до 24 лм/Вт, у ЛЛ – від 60 до 100 лм/Вт;

– найвищий, порівняно з будь-якими іншими ДС, термін дії – близько 50 000 год, за умови, що будова СД лампи якісна, і під час її виготовлення використовувалися високоякісні матеріали;

– отримання різних характеристик спектра без використання світлофільтрів, тобто за аналогією з ЛР;

– міцність і безпека під час використання. У разі випадкового падіння СД лампа не розіб'ється і не буде пошкоджена. Її елементи не містять небезпечних компонентів хімічного походження, наявних, приміром, в ЛЛ;

– не залежить від кількості увімкнень і вимкнень, у інших ДС кількість увімкнень-вимкнень значно впливає на тривалість дії;

– безпечна під час роботи – не потрібен струм високої напруги, найбільша температура СД і освітлювальної арматури не перевищує 60 °С.

Негативні характеристики:

- висока ціна. Вартість СД ламп на сьогодні перевищує вартість ЛЛ аналогічної потужності у 8–10 разів. Зниження роздрібною ціни без втрати якості – головне завдання виробників СД ламп;
- потреба в зворотному теплорадіаторі. Розміри СД занадто малі й тепло, що утворюється під час роботи, самостійно відводиться не може – що потужніша СД лампа, то більший розмір і площа радіатора їй необхідна. Відповідно, значний розмір алюмінієвого радіатора впливає на собівартість лампи, до того ж потужну СД лампу буде важко або неможливо встановити в звичайні світильники – вона в них не поміститься;
- за відсутності конденсатора, що вирівнює світловий потік СД, спостерігається помітна пульсація світла;
- якщо будова лампи виконана на дешевих СД, її світловіддача знижується до максимальних 100 лм/Вт і стає такою самою, як у ЛЛ, тобто втрачається важлива перевага світлодіодної лампи;
- світловий спектр, генерований СД, монохромний і істотно відрізняється від природного сонячного випромінювання. Щоб пом'якшити монохромне світлове випромінювання потрібні люмінофори спеціального складу;
- генерується вузько направлений світловий потік, що потребує установа декількох різнонаправлених ламп або розсіювача світла, однак застосування останнього істотно знижує інтенсивність освітлення.

3.3 Класифікація світлодіодів

У корпусі СД може міститися один кристал (однокристалні світлодіоди) або декілька кристалів (багатокристалні світлодіоди або матриці).

СД розподіляють на групи так:

- зі струмом живлення менше 30 мА, силою світла 500–1 000 мкд, що застосовуються для сигналізації в системах відображення інформації;
- зі струмом живлення 30–100 мА, силою світла 1–3 кд, використовуються як для сигналізації в системах відображення інформації, так і для освітлення;
- зі струмом живлення понад 100 мА, їхній світловий потік яких понад 10 лм, вони призначені для освітлення;
- зі спеціальними пристроями для оптимізації робочих режимів.

Головними показниками СД, які визначають їхню ефективність, є квантовий вихід, коефіцієнт корисної дії, довговічність і світлова віддача.

Під **квантовим виходом** розуміють кількість випромінюваних квантів світла на одну рекомбіновану електронно-діркову пару, виражають у відсотках. Розрізняють внутрішній і зовнішній квантовий вихід. *Внутрішній* – це

характеристика самого р-п-переходу, його конструкції і матеріалу, *зовнішній* квантовий вихід визначає характеристику приладу загалом. Різниця між внутрішнім і зовнішнім квантовим виходом обумовлена втратами в матеріалі СД. Внутрішній квантовий вихід для кристалів із хорошим тепловідведенням сягає майже 100 %. Максимальне значення зовнішнього квантового виходу для червоних СД становить 55 %, а для синіх – 35 %. Зовнішній квантовий вихід – одна з головних характеристик ефективності СД.

Коефіцієнт корисної дії (далі – ККД) також є показником ефективності використання СД електричної енергії. ККД значною мірою залежить від форми спектра і може наближено визначатися через значення енергії кванта світла в спектральному максимумі.

До головних переваг світлодіодів відносять їхню високу **надійність** і довговічність. **Термін дії** світлодіодів сягає 100 тис. годин.

За рівнем **світлової віддачі** світлодіоди давно випередили ЛР і впритул наблизилися до ЛЛ.

Приміром, створено СД білого кольору зі світловою віддачею 25–30 лм/Вт, колірною температурою $T_k = 6\,000\text{--}8\,500\text{ К}$ і загальним індексом передачі кольору $R_a = 80$, а кольорові (червоні) – зі світловою віддачею 50 лм/Вт.

Сучасні СД можна умовно розподілити на декілька головних груп за вживаною потужністю і робочим діапазоном струмів – індикаторні, надяскраві і потужні.

Індикаторні СД – компактні СД, їхня сила світла, відносно невелика (до 100 мкд). Робочий діапазон струму – понад 20 мА. Ці СД зазвичай мають стандартний корпус з виводами (діаметр основи 3 або 5 мм).

Такі СД застосовують, головню, як малогабаритні освітлювачі, різноманітні індикатори й елементи в оптронах; їх називають оптичними ізоляторами (ОІ).

Надяскраві СД здебільшого складаються на напівпровідникових кристалах малого і середнього розміру (від $200 \times 200\text{ мм}$ до $500 \times 500\text{ мм}$) і відрізняються високими світловими характеристиками (сила світла до 10 кд, середній світловий потік у білому кольорі близько 20–30 лм і більше). Робочий діапазон струмів – від 20 до 150–200 мА. Можуть виготовлятися в стандартному корпусі з виводами (діаметр основи 3,5 або 10 мм) або в корпусі для поверхневого монтажу (SMD-світлодіоди). Необхідно зазначити, що надяскраві СД посідають проміжне місце між індикаторними і потужними СД, чітку межу між ними визначити достатньо складно. Надяскраві СД мають широкий спектр застосування – світлова реклама, дорожні світлофори і покажчики, автомобільна світлотехніка, екрани, мобільні телефони тощо.

Потужні СД мають найбільші розміри кристалів і найбільші значення світлової віддачі (понад 50 лм/Вт для білого кольору). Споживана потужність в номінальному режимі (струм 350 мА) становить 1 Вт. Дозволяється застосування при струмах 500, 700, 1000 мА і вище. Збільшення робочого струму уможливорює збільшення світлового потоку. Їх виготовляють у корпусі для поверхневого монтажу (SMD-корпусі). Головним призначенням потужних СД є їх використання в різноманітних освітлювальних установках.

Протягом останнього часу СД стали класифікувати і за місцем застосування. Західні виробники ввели нове поняття – СД для освітлення (Lighting Class LED). Ці світлодіоди повинні задовольняти певні вимоги до характеристик – світловий потік і колірна температура. Зокрема, як декларується провідними виробниками, світловий потік таких СД не повинен знижуватися більше ніж на 30 % відносно початкового значення протягом 50 000 год роботи, а змінювання колірної температури не повинно бути візуально помітним.

3.4 Особливості конструкції світлодіодів

Технології вирощування кристалів

Одним із головних компонентів, які входять до складу СД, є напівпровідниковий кристал. Для СД, що випромінюють світло в довгохвильовій частині спектра – червоній, помаранчевій і жовтій – у наш час здебільшого використовують кристали на базі розчинів фосфідів алюмінію, індію і галію – AlInGaP. Для СД, довжини хвиль випромінювання яких міститься в короткохвильовій частині спектра – зеленій, блакитній і синій – використовуються кристали на базі нітриду галія – GaN і його твердих розчинів – InGaN і AlGaN. Кристали на базі GaN і його твердих розчинів також використовують для одержання білих СД. До складу таких СД входить додатково люмінофор, а в стандартному випадку його виготовляють на базі алюмо-ітрієвого гранату (YAG).

Застосовують дві технології вирощування кристалів на базі GaN і його твердих розчинів:

1) найрозповсюдженіша технологія, яку використовують більшість виробників, полягає у вирощуванні структур нітридів на сапфіровій (Al_2O_3) підкладці;

2) технологія, що передбачає використання для вирощування кристалів на базі GaN і його твердих розчинів підкладок із карбиду кремнію (SiC).

На початку 90-х років XX сторіччя японські дослідники створили перший СД на основі GaN-структур з р-n-переходом, вирощених на підкладках із Al_2O_3 . Структура СД була вирощена на сапфіровій підкладці. СД випромінював світло в УФ і синьому діапазоні, його ККД становив близько 1 %. Для того часу це була достатньо значна величина для GaN на сапфіровій підкладці, коли спостерігається велике неузгодження параметрів решітки.

Усього лише через рік співробітники японської компанії «Nichia Chemical» розробили нову систему вирощування GaN і запропонували спосіб одержання перших СД блакитного і зеленого свічіння. СД виготовлялися на базі гетероструктур GaN і його твердих розчинів – InGaN і AlGaIn блакитного і зеленого свічіння. ККД СД досягав 10 %.

Дослідники фірми «Nichia» довели також, що кристали на базі GaN і його твердих розчинів можна використовувати для одержання СД білого свічіння. Було запропоновано метод використання люмінофорів, що перетворюють довжину хвилі синього свічіння кристалу в жовто-зелене. В результаті складання сигналів у зазначених діапазонах утворюється білий колір свічіння.

Перші структури, незважаючи на достатньо високий квантовий вихід, містили велику кількість домішок і дефектів, що знижувало їхню ефективність.

Зміни відбувалися доволі швидко. Поступово концентрація дефектів і дислокацій у структурах зменшувалися, а отже покращувалася їхня якість. У наш час багато компаній виготовляють СД кристали на базі гетероструктур GaN і його твердих розчинів, вирощених на підкладках Al_2O_3 синього кольору свічіння з ККД близько 40–45 %.

Окрім технології вирощування гетероструктур GaN і його твердих розчинів на підкладках Al_2O_3 , існує альтернативна технологія вирощування структур на базі карбиду кремнію (SiC), розроблена компанією «Cree».

Технологія вирощування структур GaN на підкладках SiC відрізняється низкою принципових відмінностей порівняно з технологією GaN на сапфірі. Карбід кремнію має іншу порівняно з Al_2O_3 структуру кристалічної ґратки, що змінює процес вирощування GaN-структур на таких підкладках.

По-перше, карбід кремнію SiC має на порядок більшу теплопровідність (350–490 Вт/мК у SiC відносно 30–40 Вт/мК у Al_2O_3), що поліпшує відведення тепла з активної області (р-n-переходу) і змінює теплові характеристики кристала. По-друге, кристалічна ґратка SiC має більшу, порівняно з сапфіром, спорідненість з GaN, що збільшує квантовий вихід кристала.

Крім того, на базі карбиду кремнію, як напівпровіднику, можна розробляти кристали з вертикальним проходженням струму, що спричиняє зменшення опору структур, зниження величини робочої напруги і, як наслідок, зниження споживаної потужності.

Необхідно зазначити, що останнім часом низка компаній-виробників кристалів успішно опанували технологію відділення структури GaN від підкладки Al_2O_3 і її наступного монтажу на різноманітні тепло- й електропровідні матеріали (ліфт-офф технології).

Ця технологія уможливує поліпшення теплових і електричних якостей кристалів і збільшення квантового виходу випромінювання. Нова група кристалів вирізняється певними принциповими технологічними відмінностями, які дають змогу підвищити ефективність виведення випромінювання і світлової віддачі СД. Необхідно зазначити, що, окрім зазначених переваг карбід кремнію є досить дорогим матеріалом порівняно із сапфіром, тому технологія вирощування кристалів GaN на сапфірі дешевша, ніж на SiC.

Корпуси деяких світлодіодів

Відомі декілька типів корпусів СД. Головно необхідно розрізнити вивідні корпуси й корпуси поверхневого монтажу. Вивідні корпуси використовують здебільшого в індикаторних і надяскравих СД, а корпуси поверхневого монтажу (SMD-корпуси) – у надяскравих і потужних СД.

Корпус вивідного світлодіода складається з металевої рамки з відбивачем та контактами і епоксидного ковпачка, який виконує функцію лінзи. Конструкцію такого СД подано на рисунку 3.5. Напівпровідниковий кристал СД монтується в чашку відбивача металевої рамки, яка має позитивні і від’ємні контактні майданчики відповідно.

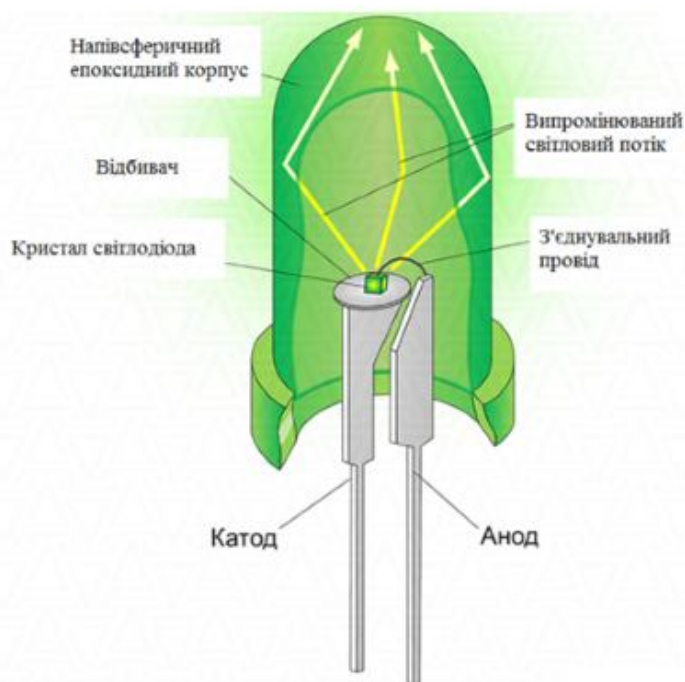


Рисунок 3.5 – Конструкція світлодіода в корпусі з діаметром 5 мм

Контактні майданчики, розташовані на верхній грані кристала для забезпечення електричного контакту з ніжками рамки, приварюються за допомогою з'єднувальних проводів до позитивного і від'ємного виводів рамки – анода й катода відповідно. Матеріалом вивідного проводу зазвичай слугує золотий дріт. Кристал може монтуватися за допомогою клею (теплопровідного або струмопровідного) чи лютувальної пасти. Клей або паста забезпечують, насамперед, виведення тепла від кристала під час виділення в ньому електричної потужності внаслідок проходження через нього електричного струму.

Струмопровідний клей або лютувальна паста також можуть забезпечувати електричний контакт кристала з рамкою, якщо кристал має нижній провідний шар, а металізований контактний майданчик – нижній контакт. У цьому разі з'єднувальний провід приварюється тільки до верхнього контактного майданчика кристала – верхнього контакту. Зібрану описаним чином арматуру вкривають зверху епоксидною смолою з утворенням напівсферичного епоксидного корпусу, який є лінзою. Ця лінза і відбивач основи утворюють первинну оптичну систему СД.

Протягом останнього часу багато виробників випускають надяскраві СД в **SMD-корпусах (surface montage details)**.

СД в описаних корпусах випускаються з різними кутами кривих світлорозподілення: 15, 20, 25, 30 і 60°, а також 70° × 30°, і 100° × 40°. Конструкція SMD-корпусу потужного СД зображена на рисунку 3.6.

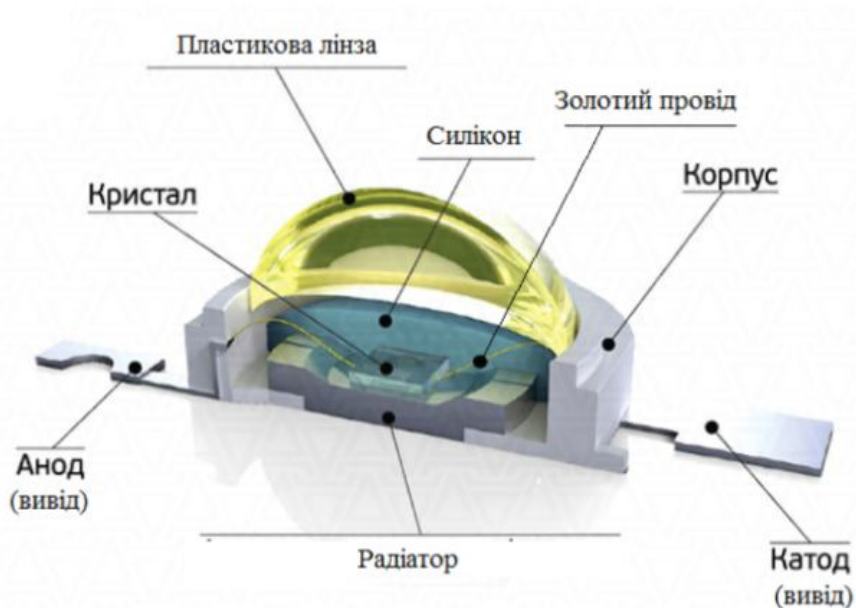


Рисунок 3.6 – Конструкція SMD-корпуса потужного світлодіода

Однією із головних частин SMD-корпуса СД є тепловивідна основа – радіатор, на якому розміщується відбивач. На рисунку 3.6 показано, що ці елементи розміщуються в пластмасовому корпусі, може також використовуватися керамічний корпус (рис. 3.7).

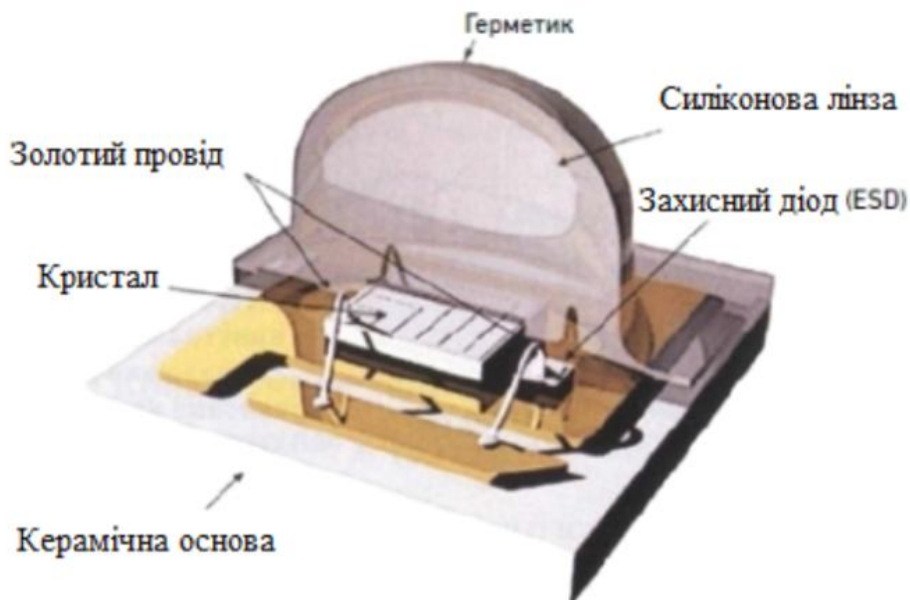


Рисунок 3.7 – SMD-корпус потужного світлодіода з керамічною основою

Напівпровідниковий кристал монтується у відбивач на теплопровідній основі, кристал також може монтуватися за допомогою клею (теплопровідного або струмопровідного) чи лютованої пасти. Багато виробників паралельно до кристала монтують захисний діод для підвищення надійності СД. Деякі компанії використовують технологію перевернутого монтажу, за якого кристал монтується основою вверх, а контактами вниз (рис. 3.8).

Зазвичай кристал монтують на кремнієвій підкладці, розміщеній на дні відбивача. За стандартного монтажу контактні майданчики, розташовані на верхній грані кристала, приварюються за допомогою золотого провідника до від'ємного і позитивного виводів – катода і анода відповідно.

Об'єм відбивача зі змонтованим у ньому кристалом заповнюють оптичним гелем на базі силікону (силіконовий герметик). З одного боку, цей гель збільшує коефіцієнт виведення випромінювання із кристала, з іншого – дає змогу кристалу й провідним контактам не руйнуватися в разі теплового розширення під дією виділеного тепла внаслідок проходження електричного струму. Тепловивідна основа й заповнення гелем сприяє тому, що кристал в такому корпусі працює за більш високої температури, ніж у корпусі з

діаметром 5 мм, і, як наслідок, уможлиблює подавання через кристал такого СД більшу густину струму.

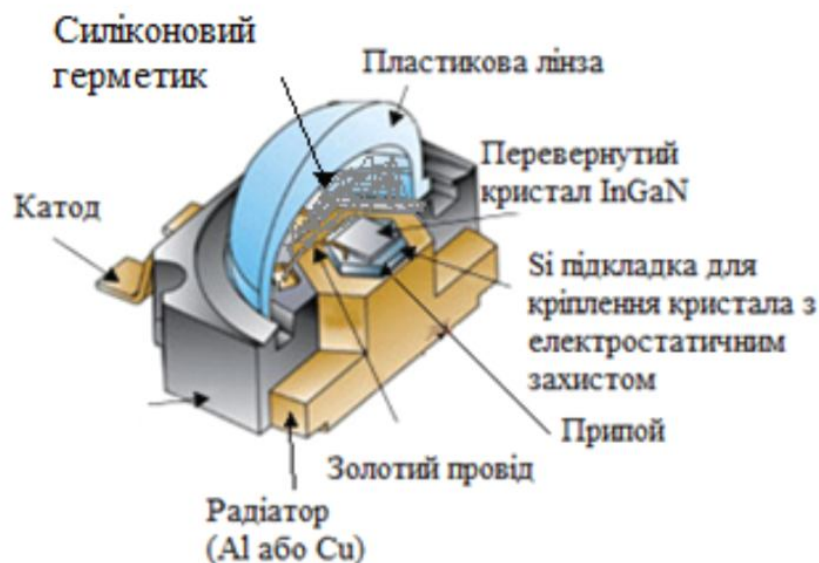


Рисунок 3.8 – Конструкція SMD-корпуса потужного СД з перевернутим кристалом

Заповнений зверху гелем відбивач закривається лінзою, яку різні виробники можуть виготовляти з різних матеріалів – кварцового скла або силікону (рис. 3.7) чи пластика (рис. 3.6). Лінза жорстко не фіксується, тому її називають плаваючою, вона утримується за допомогою адгезії гелю та полімеризації, що уможлиблює їй зміщення при тепловому розширенні внаслідок нагрівання СД.

Оптична система СД в SMD-корпусі забезпечує достатньо широкі кути кривої світлорозподілення, зазвичай понад 90°. Для SMD-корпусів протягом останнього часу все частіше стали застосовують матеріали на базі кераміки з підвищеною теплопровідністю.

3.5 Світлодіоди білого свічення

Базовими у загальному робочому освітленні є СД білого свічення. Отримати біле свічення можна за допомогою одного із трьох способів:

– шляхом змішування випромінювання СД трьох і більше кольорів (наприклад червоного, зеленого і блакитного). Ефективність найбільша, але необхідно мати багато контактних виводів, кілька діодів із різними напругами та інші додаткові пристрої для формування спектра світла, що створює незручності;

– змішування блакитного світла СД з випромінюванням люмінофора (наприклад жовто-зеленого або зелено-червоного), утвореного цим свічінням. Цей спосіб найпростіший і найекономніший. Шляхом підбору кристалів створюється спектр випромінювання для збудження люмінофора. Кристал укривається шаром гелю з порошком люмінофору. Товщина шару має бути така, щоб частина блакитного випромінювання збуджувала люмінофор, а частина проходила без поглинання.

– змішування випромінювання трьох люмінофорів (червоного, зеленого і блакитного), збуджуваних УФ СД. Використовуються принципи і люмінофори ЛЛ. На випромінювачі використовуються всього два контактні введення, що позитивно, однак спостерігаються значні втрати на перетворення випромінювання в люмінофорах, що негативно. Ефективність зменшується, оскільки різні люмінофори мають різні спектри збудження.

У наш час головним способом одержання білого СД вважається другий спосіб, коли комбінують кристал синього свічіння і люмінофор. Для одержання холодного (діапазон корельованої колірної температури 5 000–10 000 К) і природного (діапазон 3 700–5 000 К) відтінків білого кольору використовують синій кристал на базі InGaN/GaN-гетероструктури і люмінофор на базі YAG. Для одержання теплого (діапазон корельованої колірної температури 2 600–3 700 К) відтінка свічіння до цієї комбінації додається додатний люмінофор, який випромінює в червоній області спектра.

Типові спектри білих СД різних відтінків наведені на рисунку 3.9.

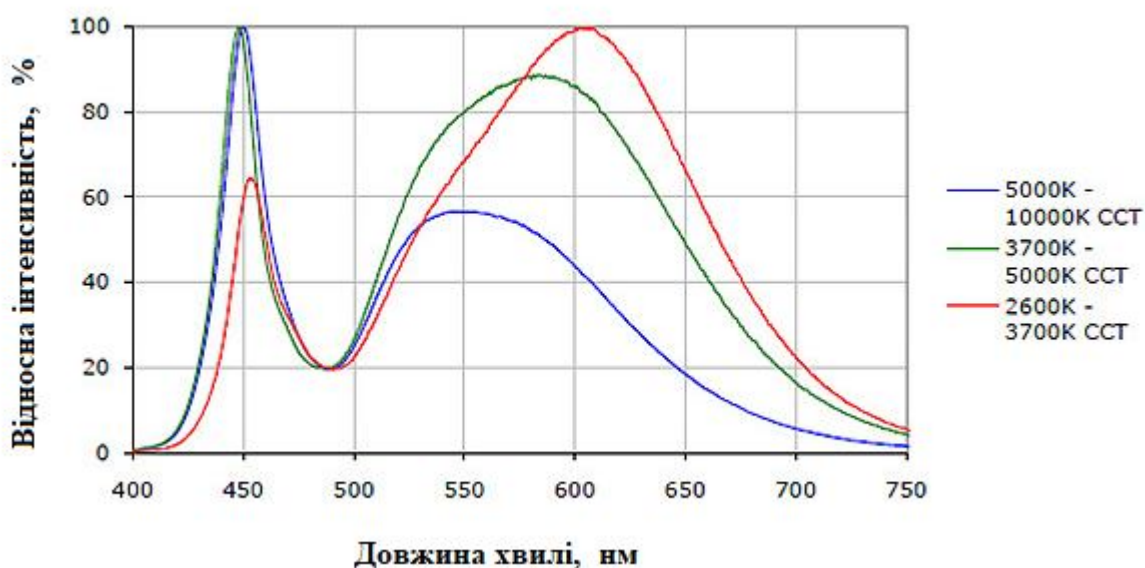


Рисунок 3.9 – Типові спектри білих світлодіодів холодного (5 000–10 000 К), природного (3 700–5 000 К) і теплого (2 600–3 700 К) діапазонів

Зрозуміло, що розміщення максимумів спектральних ліній СД холодного і природного діапазонів білого кольору практично однакові, різняться тільки співвідношення інтенсивностей їх синьої і жовто-зеленої смуг – у холодному діапазоні; синя смуга більше, а жовто-зелена менш інтенсивна порівняно з природним діапазоном.

У СД теплого білого діапазону смуга люмінофора ширша і має два максимуми в жовто-зеленій і червоній областях, що відповідає максимумам випромінювання двох люмінофорів, а синя смуга менш інтенсивна через втрати на збудження другого люмінофора.

Отже, шляхом з'єднання випромінювання більше ніж трьох кольорів можна отримати біле світло з індексом передачі кольорів, близьким до 100 %. У наш час отримано білі СД, що мають світлову віддачу не менше 30 лм/Вт (теоретичну межу ~ 300 лм/Вт), вищу, ніж у ЛР.

Порівняння властивостей білих світлодіодів зі звичайними джерелами світла

Рекордних значень світлової віддачі білих СД досягли в 2011 році – 210 лм/Вт, а в 2012 році – 254 лм/Вт, значення для кращих комерційних СД сягнуло 120 лм/Вт.

У 2015 році компанія «Срее» (США) заявила про перші отримання зразків білих СД з ефективністю в 303 лм/Вт. До того ж, за оцінками фахівців, фізична межа ефективності становить 365 лм/Вт (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Світлова ефективність СД і ефективність різних джерел світла

Джерело світла	Тип	Світлова ефективність (лм/Вт)
Лампа розжарювання	40 Вт вольфрамова розжарювання (120 В)	12,8
	100 Вт вольфрамова розжарювання	17,5
	Кварцова галогенна (12–24 В)	24
Люмінесцентна лампа	Компактна люмінесцентна 9–26 Вт	57–72
	Трубка з електромагнітним баластом Т8	80–101
РЛВД	Металогалогенна	65–115
СД	Потужні білі СД	115

СД, як твердотільні прилади, що працюють при температурах близьких, до кімнатної, мають значно більший термін дії, ніж ЛР і ЛЛ. Термін дії СД при сталих режимах – 50 тис. годин. Вони малі за розмірами, але частина електричної енергії (навіть при ККД близько 50 %) використовується на нагрівання. Підвищення температури спричиняє зменшення світлової віддачі.

Отже, в конструкції СД використовують корпуси, що забезпечують хороше тепловідведення, що уможлиблює збільшення струму через діод і, таким чином, збільшення світлового потоку. СД, на відміну від звичайних ламп, не перегорають, а поступово зменшують свою ефективність. Термін дії визначається падінням інтенсивності випромінювання, наприклад до 70 % від початкового значення. Ще одна перевага СД – вібростійкість.

СД не містять ртуті, свинцю та інших важких металів, що важливо для безпечної експлуатації, вони не потребують утилізації пошкоджених приладів.

Важлива відмінність – живлення постійним струмом низької напруги. На одному СД за прямого струму падає напруга подібно до контактної різниці потенціалів, тобто залежно від довжини хвилі випромінювання – від 1,8 до 3,5 В. Зазвичай у лампах застосовують послідовне або послідовно-паралельне з'єднання декількох діодів. Напруга джерела живлення обирається рівною 12–24 В. У приміщеннях з пожежною та вибуховою небезпекою СД мають перевагу.

Площа кристалів СД становить близько 1 мм², це майже точкові джерела світла. Лінзи та відбивачі з СД створюють випромінювання в заданому тілесному куті (3–120°), що уможлиблює ефективне використання світлового потоку для освітлення необхідної частини простору.

Можна керувати як інтенсивністю, так і спектром випромінювання. Люмінофори для білих СД, збуджені синім випромінюванням кристала, уможлиблюють створення СД «холодного» (тобто яскравого денного) світла з корельованою колірною температурою близько 6 000 К, «нейтрального» – із $T_{кол} \approx 4\,000$ К, «теплого» (тобто вечірнього, близького до кольору ЛР) з $T_{кол} \approx 3\,000$ К.

Світлодіодні освітлювачі (далі – СДО), конструкція яких подана на рисунку 3.10, із білим свіченням зі збільшеним світловим потоком (понад 15 лм) розроблені на базі кристалічних «чипів» великої площі, із збільшеним робочим струмом і покращеною конструкцією тепловідведення.

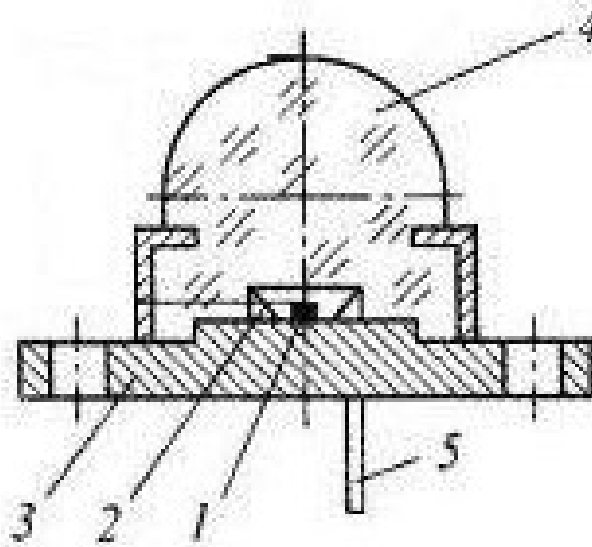


Рисунок 3.10 – Конструкція світлодіодного освітлювача (переріз):
 1 – випромінювальні кристали (від 1 до 4); 2 – відбивач бічного випромінювання; 3 – кристалотримач; 4 – полімерна сферична лінза;
 5 – ізольовані виведення

Випромінювальні кристали вирощені на сапфіровій підкладці і вкриті люмінофором.

Площа активної області – від 0,7 до 1,1 мм². Якщо кристал не вкривають люмінофором, то його розміщують у прозорому полімері (зерна розміром від 1 до 2 мкм).

Біле свічіння створюється шляхом складанням спектрів смуг: блакитної і жовто-зеленої. Змінюючи товщину люмінофорного покриття та його кількість в полімері, можна змінювати співвідношення блакитного та жовто-зеленого спектрів, що уможливорює створення заданих кольорних характеристик.

Розроблені СДО для забезпечення тепловідведення необхідно застосовувати з радіаторами. Нагрівання корпуса, порівняно з навколишнім середовищем, не повинно перевищувати 10 °С.

3.6 Світлодіодні модулі або кластери

Окремо необхідно зупинитися на світлодіодних модулях. СД-модулі становлять утворення з багатьох кристалів, з'єднаних у послідовно-паралельні ланцюги на одній платі [9, 13].

СД-модулі виготовляють у вигляді плат із контактами для лютування і отворами для закріплення. Вони можуть мати живлення на платі з убудованими

драйверами. Головним їх призначенням є застосування в освітлювальному обладнанні.

У сучасних СД білого світла в наш час спостерігається значний рівень світлової віддачі (231 лм/Вт у лабораторних умовах і білі – 110–130 лм/Вт у серійному виробництві). Технологія їхнього виготовлення і матеріали продовжують вдосконалюватися, що дає змогу одержати більше світла від одного СД. Проте одиничний СД (а саме світлодіодний чіп) дає порівняно мало світла для потреб освітлення, тому на практиці світлодіодні лампи й світильники становлять утворення з двох або більше СД із повним набором електричних, оптичних, механічних і теплових компонентів. Такі утворення називаються світлодіодними модулями або кластерами [9].

Світлодіодні модулі можуть бути різними за варіантами виконання. Головне, що їх об'єднує, – електричне сполучення кількох СД або кристалів у послідовно-паралельні ланцюжки (рис. 3.11).

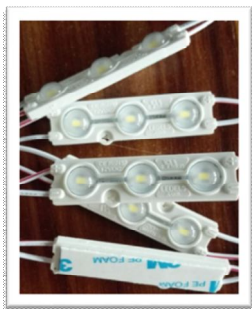


Рисунок 3.11 – Приклад світлодіодного модуля, виготовленого фірмою «Osram»

Базові сучасні технології виготовлення світлодіодних модулів

Необхідність підвищувати потужність для збільшення світлового потоку призвела до того, що традиційна форма одночипового корпусного СД перестала задовольняти виробників унаслідок незадовільних умов відведення тепла. Потрібно було максимально наблизити кристал СД до теплопровідної поверхні. У зв'язку з цим традиційну технологію було замінено на вдосконалену SMD-технологію (surface montage details – поверхневий монтаж деталей) і технологію COB (chip on board). СД, виготовлені за SMD- і COB-технологією, монтуються (приклеюються) безпосередньо на загальній підкладці, яка може виконувати роль радіатора – у цьому разі її виготовляють з металу або теплопровідної кераміки. Таким чином створюються світлодіодні модулі, які можуть мати лінійну, прямокутну або колову форму, бути твердими або гнучкими залежно від вимог щодо конструкції освітлювальної системи.

Головна відмінність COB-технології порівняно з попередніми технологічними рішеннями полягає в удосконаленні та спрощенні процесу

монтажу напівпровідникових кристалів. СД в COB-модулях не ізолюються спеціальним захисним корпусом, а прикріплюються до поверхні радіатора (здебільшого це корпус світлодіодного освітлювального пристрою).

Функцію відведення тепла в цьому разі виконує сам корпус, виготовлений із матеріалів, що зі значною теплопровідністю. Світлодіодна продукція COB за тепловими параметрами на порядок перевищує всі наявні світлодіодні аналоги (здебільшого це дискретна технологія), виготовлені на базі попередніх технологічних рішень [12].

У COB-модулі безкорпусні кристали встановлені безпосередньо на металеву основу, що дає змогу забезпечити тепловий опір модуля <1 °C/Вт на більших чипах і 2-3 °C/Вт на кристалах малих розмірів. Відповідно, у COB-модулях забезпечено менший тепловий опір між зоною рекомбінації кристала й зовнішнім середовищем порівняно з платою із корпусними СД, що, безперечно забезпечує поліпшене тепловідведення від модуля порівняно із широко використовуваними раніше технологіями складання корпусованих СД на платах.

У багатокристалльному COB-модулі немає корпуса у СД. Напівпровідникові кристали кріпляться безпосередньо до плати. Як підсумок, вартість COB-модуля буде нижчою за вартість плати з корпусними СД.

У SMD-світлодіоді корпус має спеціальний майданчик для кріплення до теплопровідної поверхні, замість якої можна використати наявну друковану плату з будь-якою теплопровідною основою без додаткового радіатора. Зручним є автоматизоване монтування SMD-світлодіодів, хороша теплопровідність корпуса й висока світловіддача уможливають вибір оптимальних і різноманітних рішень для створення систем освітлення. Наявні SMD-світлодіоди розподіляються на малопотужні (до 0,1 Вт), середньої потужності (0,1–1 Вт) та потужні (понад 1 Вт).

Як теплопровідну поверхню, окрім SMD-світлодіодів, можна використовувати різні плати з основами, матеріали яких відрізняються за теплопровідністю.

На відміну від світлодіодних COB-модулів, у системах освітлення, що містять окремі СД як у вигляді систем з великою площею свічіння, так і у вигляді точкових джерел світла, необхідно монтувати СД на друковану плату шляхом лютування в конвекційній печі. На практиці рекомендується здійснювати монтаж СД за допомогою автомата-установника із наступним лютуванням. Цей метод досить складний і потребує інвестування у відповідне обладнання. Можливість об'єднувати на одній такій друкованій платі безліч СД, монтування компонентів за допомогою стандартних автоматизованих технологій лютування, використання плати як радіатора охолодження, – усе це

в комплексі забезпечує створення компактних високоефективних освітлювальних приладів.

Переваги світлодіодних COB-модулів

У багатьох освітлювальних системах замість окремих СД використовують COB-модулі, що містять набір СД кристалів. Багатокристалльні СД матриці монтуються легко. Крім того, їхня схема підімкнення досить проста. Сьогодні значення енергетичної ефективності COB-модулів сягає 160 лм/Вт і більше.

Найпростіші для застосування COB-модулі призначені для систем освітлення з розсіяним випромінюванням. Здебільшого, хоч за розміром вони й значні, їх можна монтувати вручну. Паяння в конвекційній печі, як домінуючу технологію створення з'єднань СД в SMD-корпусах, застосовувати не обов'язково. Матриці мають на поверхні полуджені контактні майданчики, що уможлиблює монтування СД вручну або за допомогою модулів кріплення. Відведення тепла відбувається через корпус.

COB-технологія має такі переваги:

- зменшення собівартості СД приладів і збільшення ефективності їхньої роботи;
- уможлиблює значну яскравість світла навіть при невеликих розмірах світловипромінювальної площі;
- кількість виробничих операцій зменшується вдвічі порівняно з технологією SMD, значно скорочуються строки виробництва СД приладів;
- високий показник оптичної щільності випромінювача (на одній одиниці площі підкладки можна встановити до 70 чипів);
- збільшений термін дії кристалів СД, надійність і ефективність тепловідведення;
- сумісність із різними електронними системами керування димірування світла;
- рівномірний розподіл світлового потоку, відсутність ефекту тіней;
- компактність, невеликі розміри.

Сьогодні для побутового й загальнопромислового освітлення використовують лампи-ретрофіти, у яких, як випромінювачі малої й середньої потужності, широко застосовуються плоскі COB- і SMD-модулі [9]. Модулі зазвичай виготовляють у вигляді плоских круглих, кільцевих або багатокутних друкованих плат з металізованою або виконаною на базі теплопровідної кераміки основою, зі СД з паралельними оптичними осями. СД і модулі встановлюють у захисній світлорозсіювальній колбі (з діаметром 50–60 мм) у

тепловому контакті з поєднаним із платою й винесеним із колби в навколишній простір радіатором охолодження. Широке освоєння виробництва таких ламп обумовлене простотою конструкції плоского СД модуля, засобів його кріплення на радіаторі охолодження, а також доступною та нескладною технологією виготовлення ламп. У лампах із цоколем Е-27 для експлуатації в побутовій мережі джерела живлення вбудовані в цокольну частину відсіку радіатора охолодження, що є спільним для СД модуля випромінювача й електронних плат керування СД (драйверів).

3.7 Світлодіодні світильники

Прогресивне розроблення потужних СД забезпечило їхній значний попит порівняно з іншими джерелами світла, що спричинило появу великої кількості пропонуваніх СД світильників. Світильники виготовляють як великі відомі фірми, так і маловідомі невеликі компанії. Сучасний СД вуличний світильник виготовлений із різних деталей: радіатора (корпуса), друкованої плати, СД або матриць, лінз для формування кривої сили світла або дзеркальних відбивачів, розсіювачів, елементів перетворення напруги або стабілізаторів струму (драйверів) різних форм і розмірів [9].

Важливим світлотехнічним параметром світлових приладів є світлорозподіл. Зазвичай, ДС (крім СД) випромінюють світло на всі боки більш-менш рівномірно. Завдяки оптичній системі світлового приладу світло перерозподіляється в просторі. Особливості перерозподілу описуються кривою сили світла (далі – КСС). Стандартами зумовлені сім типів кривих сили світла: концентрована, глибока, косинусна, напівширока, широка, рівномірна й синусна (рис. 3.12.)

Залежно від призначення світлового приладу він має певну КСС. Приміром, для освітлення високих приміщень оптимальні глибока й концентрована КСС, а для вуличного освітлення – широка. У деяких випадках необхідний асиметричний розподіл, приміром, для освітлення картин у музеях або класних дошок в навчальних закладах.

З появою потужних СД зі струмом 350 мА, а далі 700 мА і навіть 1 000 мА більшість виробників СД почали відмовлятися від застосування первинної оптики, оскільки при роботі потужних СД кристали нагріваються досить сильно, і через різницю коефіцієнтів теплового розширення матеріалів кристала та первинної оптики виникають значні механічні навантаження всередині СД, що інколи спричиняє розрив з'єднувальних провідників або відрив кристала від підкладки.

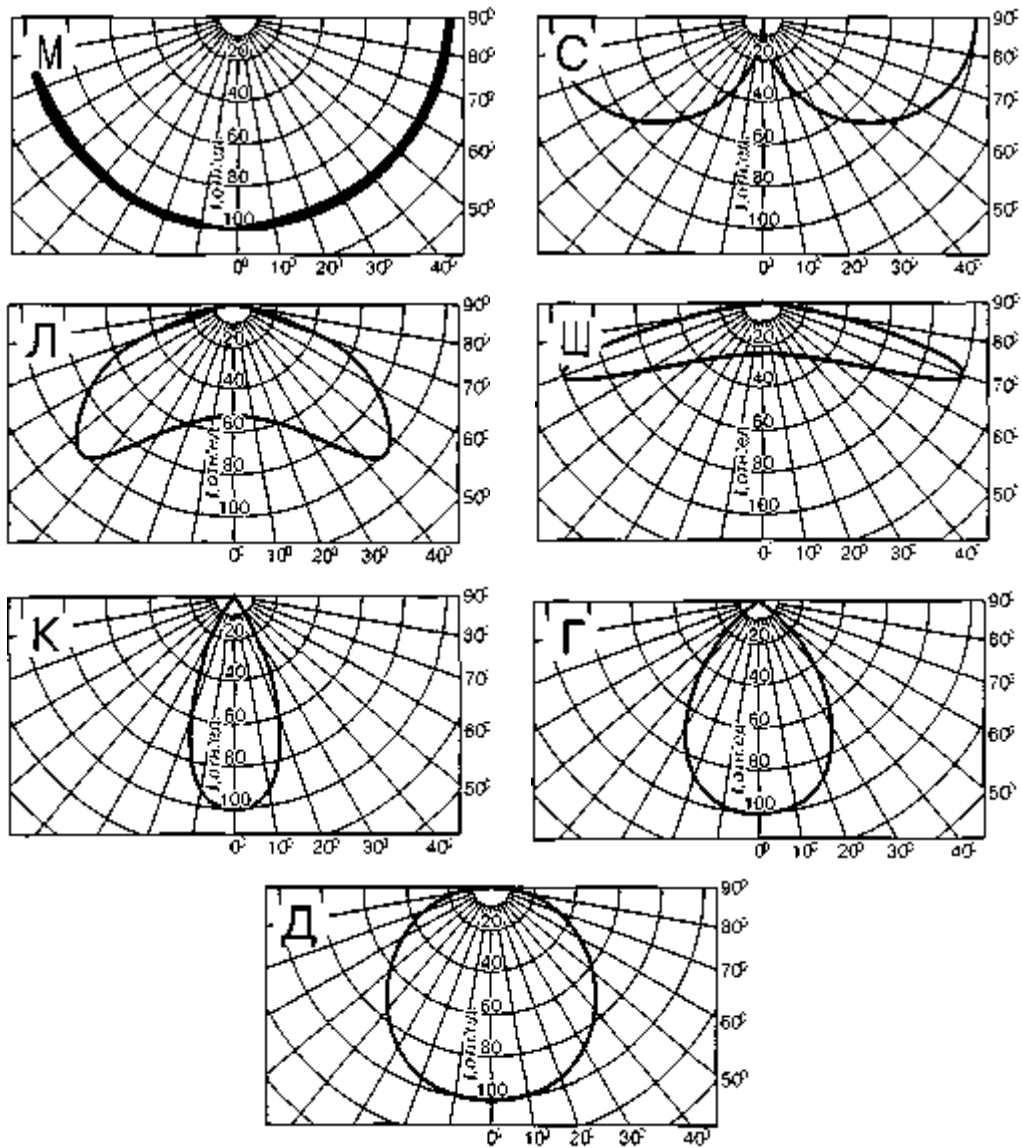


Рисунок 3.12 – Криві сили світла світильників: М – рівномірна; С – синусна; Л – напівширока; Ш – широка; К – концентрована; Г – глибока; Д – косинусна

Отже для формування необхідного світлорозподілу застосовується вторинна оптика у вигляді лінз або відбивачів (рис. 3.13).

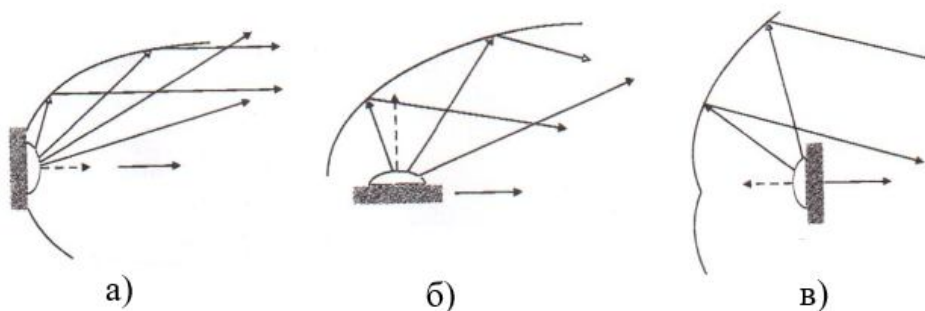


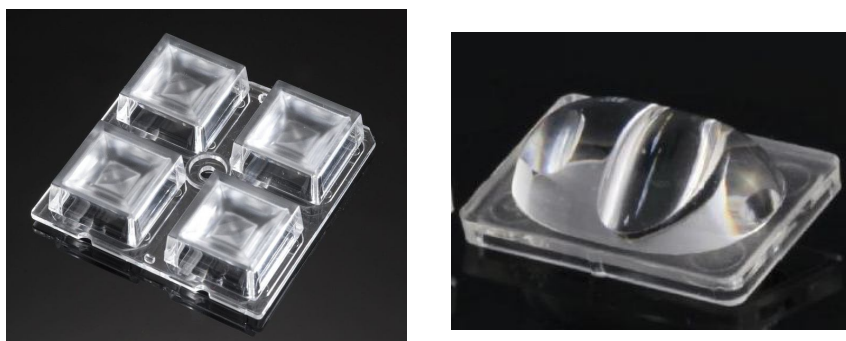
Рисунок 3.13 – Конфігурації світлодіодів з вторинною оптикою:

а) – пряма; б) – напівпряма; в) – відбиваюча

За прямої оптичної конфігурації оптична вісь ДС розміщується паралельно до головної оптичної осі відбивача. На противагу системам із прямою конфігурацією випромінювання повністю керується відбивачами довільної форми.

Можливе також і застосування проміжних (напівпрямих) конфігурацій оптичної системи. Така класифікація належить здебільшого до утворень із відбивачем. Якщо застосовуються коліматори з оптичними елементами повного внутрішнього відбиття (TIR – total internal reflection), проектори і заломлювальні системи, здебільшого використовують пряму конфігурацію, і лише в деяких випадках – непряму.

СД є площинними джерелами випромінювання. Розташовуючись на підкладці, випромінювання кристала відбувається в напівпросторі, тому всі світлодіодні пристрої можна розділити в цілому на дві групи – з прямою і непрямою конфігурацією (рис. 3.14).



а)

б)

Рисунок 3.14 – Елементи вторинної оптики світлодіодів:

а) – пряма конфігурація оптичної системи; б) – непряма конфігурація

Лінзи виготовляють із поліметилметакрилату, полікарбонату або кремнійорганічних сполук (силікону). Лінзи виготовляють для одиничних СД, світлодіодних сукупностей (модулів, матриць) чи великих блоків, що включають велику групу СД.

Під час конструювання світлових приладів необхідно брати до уваги те, що внаслідок френелівського відбиття на передній і задній поверхні лінз втрачається не менше 8 % світлового потоку.

Через те що СД випромінюють світло тільки в одну напівсферу, можливості відбивальної оптики в світлових приладах обмежені. **Відбивачі** мають дещо більші розміри порівняно з лінзами. Коефіцієнт використання світлового потоку кристалів із відбивачами – близько 85–90 %. Відбивачі виготовляють із алюмінію із великим коефіцієнтом відбивання (наприклад типу

«Migo» фірми «Аланод») або з пластику з напиленням дзеркального шару і захистом його від зовнішнього впливу.

Як лінзи, так і відбивачі потребують точності розташування відносно випромінювального кристала, тому для точності встановлення в них передбачено спеціальні напрямні.

Елементи вторинної оптики забезпечують необхідну КСС світильників. Випускають лінзи і відбивачі, які забезпечують широкі, напівширокі, косинусні, глибокі й концентровані КСС. Для вуличних світильників виготовляють лінзи з асиметричним світлорозподілом (широким у поперечній площині і концентрованим боковим – у продовжній).

3.8 Схеми підімкнення світлодіодів

СД живиться від джерела стабілізованого струму. Для живлення СД від батарейки необхідна наявність струмообмежувального резистора R (рис. 3.15).

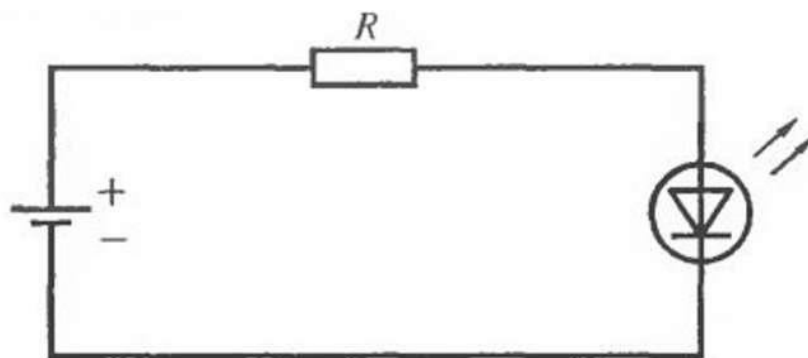


Рисунок 3.15 – Схема підімкнення світлодіода до джерела постійного струму

СД може живитися й від джерела змінного струму. До того ж послідовно зі СД необхідно підімкнути випрямний діод. Схема підімкнення СД до джерела змінного струму подана на рисунку 3.16.

СД також можуть живитися в імпульсному режимі. У цьому разі імпульсний струм, що проходить крізь прилад, може бути більшим за значення постійного струму (до 150 мА при тривалості імпульсів 100 мкс і частоті імпульсів 1 кГц). Для керування яскравістю СД (і кольором, у разі змішування кольорів) використовується широтно-імпульсна модуляція – метод, дуже поширений у сучасній електроніці. Це уможливило створення спеціальних керівних пристроїв – контролерів із функцією плавного змінювання яскравості (диммери) і кольорів (колор-чейнджери), що ефективно використовується в системах декоративного освітлення.

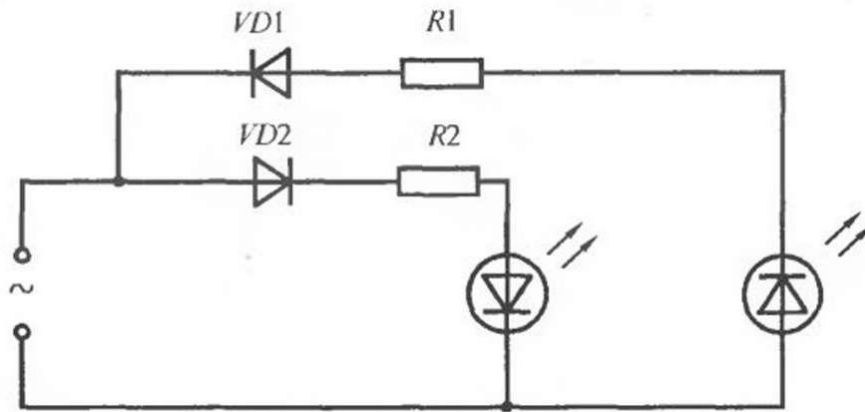


Рисунок 3.16 – Схема підімкнення світлодіода до джерела змінного струму

Світлодіодні пристрої керування (далі – СПК) (рис. 3.17) – це джерела постійного стабілізованого струму, призначеного для живлення СД у широкому діапазоні температур. Головною відмінністю СПК від традиційних джерел живлення є те, що на виході живлення в зовнішньому ланцюзі встановлюється певне значення струму (в певному діапазоні напруг).



Рисунок 3.17 – Приклади різного виконання СПК

Пристрої керування можуть бути різноманітними за конструктивним виконанням і призначатися для роботи в різних кліматичних умовах.

Базові параметри, що характеризують роботу СПК:

- струм стабілізації і точність стабілізації;
- вихідна потужність;
- ККД;
- кількість вихідних каналів;
- діапазон вхідних напруг;

- діапазон вихідних напруг;
- захист від перевантажень і аварійні режими;
- регулювання яскравості (аналогова, широтно-імпульсна модуляція);
- IP-захист.

Світлодіодні драйвери

Струм СД зростає більше, ніж напруга, що подається на нього [10]. Отже, навіть невелике змінювання напруги може призвести до значного змінювання струму, що може спричинити вихід СД з ладу. На рисунку 3.18 зображена типова вольт-амперна характеристика СД.

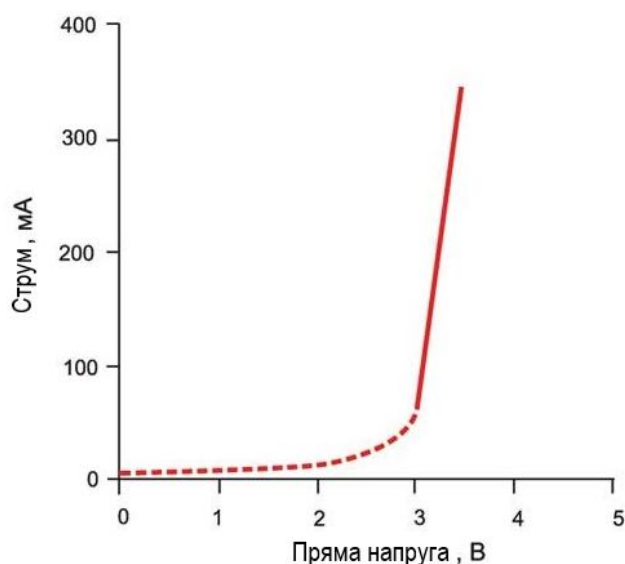


Рисунок 3.18 – Вольт-амперна характеристика світлодіода

Щоб підімкнути СД світловий прилад до джерела напруги, зокрема електромережі або батареї, і не пошкодити при цьому СД джерела світла, необхідно контролювати споживану потужність так, щоб СД могли її безпечно використати. Цю функцію виконують світлодіодні драйвери.

Світлодіодний драйвер – це електронний пристрій, що перетворює джерело напруги на джерело струму та підтримує струм на постійному рівні, незважаючи на змінювання вхідної напруги.

Світлодіодний драйвер захищає СД від звичайних коливань напруги, а також від перенапруження і стрибків напруги.

Числове значення сприйнятої яскравості випромінювання СД можна легко виміряти в одиницях поверхневої щільності світлового потоку, тобто сили світла в канделах (кд). Сумарна потужність світлового випромінювання

СД виражається в люменах (лм). Важливо розуміти також і те, що яскравість СД залежить від середньої величини прямого струму.

На рисунку 3.19 зображено графік залежності світлового потоку деякого СД від прямого струму. У разі виходу струму за межі лінійної ділянки ефективність СД зменшується, нелінійність починає виявлятися при збільшенні I_F .

У разі роботі поза лінійною областю значна частина потужності, що підводиться до СД, **розсіюється у вигляді тепла**. Це витрачене даремно тепло перевантажує драйвер СД.

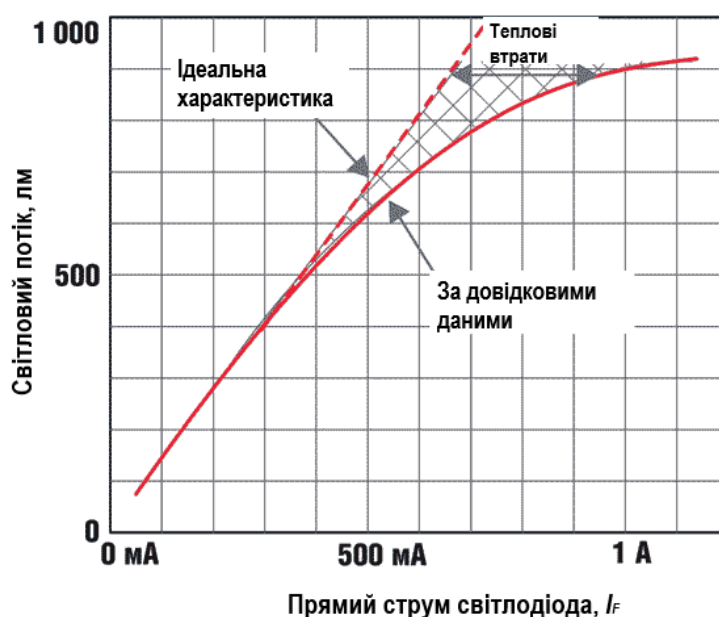


Рисунок 3.19 – Залежність світлового потоку від струму світлодіода

Світлодіодні світильники, у яких використовуються світлодіодні драйвери, підмикаються до джерела живлення так само легко, як і традиційні світильники. Усе більше вбудованих драйверів для світлодіодних світильників білого світла забезпечує регулювання світлового потоку.

Широтно-імпульсна модуляція

У більшості світлодіодних драйверів для регулювання потужності, що подається на світлодіоди, використовується **широтно-імпульсна модуляція** (далі – ШІМ).

ШІМ вмикає і вимикає СД з високою частотою, що зменшує час перебування СД у ввімкненому стані і забезпечує зменшення випромінюваного ним світла.

Загальноприйнятий метод управління яскравістю світлодіодних систем освітлення ґрунтується на використанні методу ШІМ, що передбачає часте вмикання і вимикання світлодіодного джерела світла з різним коефіцієнтом заповнення. Загалом коефіцієнт заповнення визначається як відсоток часу, упродовж якого СД увімкнений.

ШІМ становить керування середнім значенням напруги на навантаженні шляхом змінювання шпаруватості імпульсів, що керують ключем. Розрізняють аналогову і цифрову, двійкову і трійкову ШІМ.

ШІМ – це спосіб забезпечення аналогового сигналу за допомогою цифрового методу, тобто цифрової комбінації, у якій нулі і одиниці, отримання величин, що плавно змінюються. Уявімо дуже важкий маховик, який обертається двигуном, що то вмикається, то вимикається. Якщо вмикати його постійно, то маховик розкрутиться до максимального значення і буде крутитися й далі за інерцією, якщо вимкнути, то він зупиниться внаслідок дії сил тертя.

Якщо ж двигун вмикати на десять секунд кожну хвилину, то маховик розкрутиться, але не на повну швидкість – тривала інерція нейтралізує ривки двигуна, що вмикається, а опір від тертя унеможливить його рух надовго.

Що довше триватиме ввімкнення двигуна, то швидше крутитиметься маховик. При ШІМ на вихід подається сигнал що складається з високих і низьких рівнів, тобто нулів і одиниць (вмикаємо і вимикаємо двигун). Унаслідок інтегрування величина напруги на виході буде дорівнювати площі під імпульсами.

ШІМ-сигнал – це імпульсний сигнал певної частоти й шпаруватості.

Частота – кількість періодів за одну секунду.

Шпаруватість – відношення тривалості імпульсу до тривалості періоду. Можна змінювати і те й інше, але для керування СД достатньо керувати шпаруватістю.

На рисунку 3.20 зображено ШІМ-сигнал зі шпаруватістю 50 %, оскільки тривалість імпульсу (ширина імпульсу) становить половину періоду. Відповідно, СД половину часу буде перебувати у ввімкненому стані і половину – у вимкненому. Частота ШІМ дуже велика, і око не помітить мерехтіння СД через інерційність зору, тому здаватиметься, що СД світиться на половину яскравості.

Якщо змінити шпаруватість на 75 %, то яскравість СД становитиме три чверті від повної. Графічно це можна зобразити так, як показано на рисунку 3.21.

Змінюючи шпаруватість, можна плавно змінювати цю площу, а отже, і напругу на виході. Таким чином, якщо на виході суцільні одиниці, то використовуватиметься напруга високого рівня, якщо нулі – то низького.

А якщо 50 % часу становитиме високий рівень, а 50 % низький, то значення напруги буде середнім, а потужність відповідна.

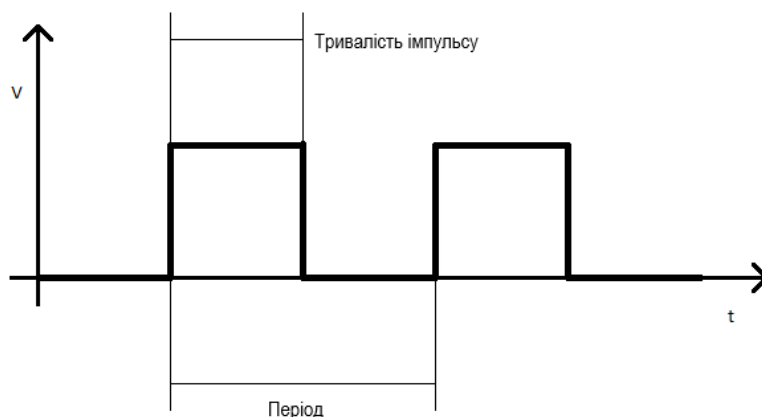


Рисунок 3.20 – ШІМ-сигнал, шпаруватість 50 %

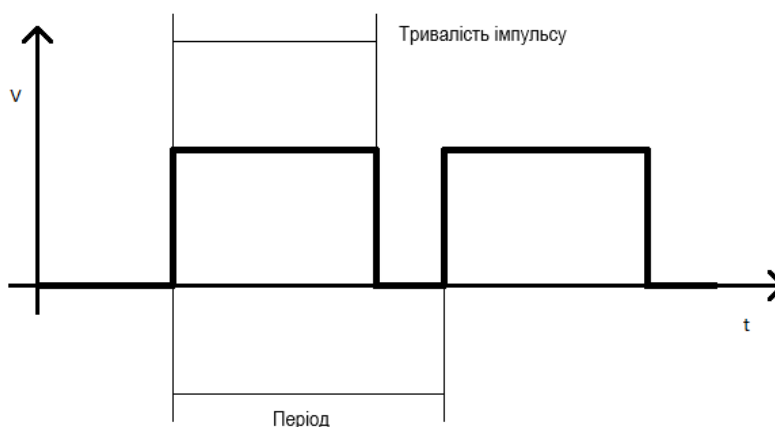


Рисунок 3.21 – ШІМ-сигнал, шпаруватість 75 %

Приклад. Акумулятор на 9 В живить ЛР. Якщо замкнути ключ, що сполучає акумулятор і лампу на 50 мс, то лампа протягом цього часу отримає 9 В. Якщо розімкнути ключ в наступні 50 мс, то лампа отримає 0 В. Коли повторювати цей цикл 10 разів за секунду, то лампа світитиметься так, ніби вона підкімнена до акумулятора в 4,5 В (50 % із 9 В). Отже, шпаруватість становить 50 %, а частота модуляції складає 10 Гц.

Контрольні питання до розділу 3

1. Принцип роботи світлодіодних джерел світла.
2. Способи отримання білого світла в СД.

3. Світлодіодні модулі та кластери.
4. Сучасні базові технології виготовлення світлодіодних модулів.
5. Конструкція світлодіодного світильника. Особливості оптичних елементів.
6. У яких режимах здійснюється живлення СД?
7. Схеми підімкнення СД до джерел постійного та змінного струмів.
8. Світлодіодні драйвери. Призначення та головні функції.
9. Принцип широтно-імпульсної модуляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Елкина Т. В. Курс лекций по дисциплине «Электрическое освещение» / Т. В. Елкина ; Гомельский государственный политехнический колледж. – Гомель : ГГПК, Республика Беларусь, 2011. – 76 с.
2. Черепанова Г. А. Электрическое освещение : конспект лекций для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 140205 / Г. А. Черепанова ; Вятский государственный университет. – Киров : ВГУ, 2007. – 51 с.
3. Гуракова Л. Д. Теплові джерела світла : конспект лекцій для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 6.050907 – Електротехніка та електротехнології / Л. Д. Гуракова ; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2004. – 45 с.
4. Споживачі електричної енергії. Електричне освітлення : навч. посібник / О. І. Соловей, А. В. Чернявський, О. О. Ситник, В. Ф. Ткаченко, Г. В. Курбака ; за ред. О. І. Солов'я ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ФОП Гордієнко Є. І., 2018. – 132 с.
5. Шеховцов В. П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов / В. П. Шеховцов. – М. : ФОРУМ, 2009. – 160 с.
6. Назаренко Л. А. Фізичні основи джерел світла : навч. посібник / Л. А. Назаренко ; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2009. – 206 с.
7. Иванов И. И. Электрооборудование и режимы использования светотехнических установок : конспект лекций по светотехнике / И. И. Иванов – Омск : ОГТУ, 2019. – 168 с.
8. Методичні рекомендації до виконання курсового проекту «Розрахунок параметрів і розробка конструкції джерела світла» з навчальної дисципліни «Джерела світла» [Електронний ресурс] : для студентів денної і заочної форм навчання фахового спрямування «Світлотехніка і джерела світла», спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Л. Д. Гуракова, К. І. Суворова, Л. Г. Баландаєва. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 47 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/54089/>, вільний (дата звернення: 05.08.2021). – Назва з екрана.
9. Назаренко Л. А. Фізика і техніка світлодіодів : навч. посібник / Л. А. Назаренко, А. І. Колесник ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 232 с.
10. Иоффе К. И. Конспект лекцій з дисципліни «Системи керування світлотехнічними пристроями» [Електронний ресурс] : для магістрів денної і

заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (спеціалізація «Світлотехніка і джерела світла») / К. І. Іоффе, О. Л. Черкашина; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 57 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/48452/> (дата звернення: 05.08.2021). – Назва з екрана.

11. Світлодіоди: фізика, технологія виготовлення, застосування : навч. посібник / В. І. Карась, Л. А. Назаренко, І. В. Карась ; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 323 с.

12. Шуберт Ф. Е. Светодиоды / Ф. Е. Шуберт. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с.

13. COB-светодиоды и лампы на их основе [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ledjournal.info/spravochnik/cob-svetodiody-i-lampy.html> (дата звернення: 05.08.2021). – Назва з екрана.

Навчальне видання

СУВОРОВА Кристина Ігорівна,
ГУРАКОВА Лариса Дмитрівна

ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Відповідальний за випуск *К. І. Суворова*
Редактор *О. А. Норик*
Комп'ютерне верстання *К. І. Суворова*
Дизайн обкладинки *Т. А. Лазуренко*

Підп. до друку 07.05.2021. Формат 60 × 84/16.
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 6,4.
Тираж 50 пр. Зам. № 10242

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.