

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Л. А. Назаренко, А. І. Колесник

# ФІЗИКА І ТЕХНІКА СВІТЛОДІОДІВ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2021

УДК 628.9(075.8)

Н19

***Автори:***

**Назаренко Леонід Андрійович** – доктор технічних наук, професор кафедри світлотехніки і джерел світла;

**Колесник Анастасія Ігорівна** – кандидат технічних наук, асистент кафедри світлотехніки і джерел світла

***Рецензенти:***

**Карась В'ячеслав Ігнатович** – доктор фізико-математичних наук, професор, начальник лабораторії ХНУ «Харківський фізико-технічний інститут»;

**Тимофеев Євген Петрович** – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник ННЦ «Інститут метрології»

*Рекомендовано до друку Вченою радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,  
протокол № 14 від 02 липня 2019 р.*

**Назаренко Л. А.**

Н19 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, 2021. – 255 с.

ISBN 978-966-695-560-2

Розглянуто фотометричні характеристики напівпровідникових приладів на основі світлодіодів. Наведено фізичні та технічні основи роботи напівпровідникових приладів, із конструкціями сучасних світлодіодів, їхніми електричними, температурними і оптичними характеристиками. Описано виконання проектів і розрахунків сучасних світлових приладів зі світлодіодними джерелами світла. Посібник дасть змогу поглибленіше вивчити властивості напівпровідникових структур.

Видання призначено для бакалаврів, магістрів, аспірантів та науково-технічних працівників спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

УДК 628.9(075.8)

ISBN 978-966-695-560-2

© Л. А. Назаренко, А. І. Колесник, 2021

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 РОЗВИТОК СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ.....	10
1.1 Із історії освітлення.....	11
1.2 Порівняння властивостей білих світлодіодів зі звичайними джерелами світла.....	17
2 ПРИНЦИП ДІЇ СВІТЛОДІОДІВ.....	20
2.1 Електролюмінесценція.....	20
2.2 Оптичні й електричні властивості світлодіодів.....	20
2.3 Класифікація світлодіодів.....	30
3 КОНСТРУКЦІЯ СВІТЛОДІОДІВ.....	32
3.1 Кристали.....	32
3.1.1 Використання контактів різної геометричної форми.....	35
3.1.2 Технологія вирощування світлодіодів на прозорих підкладках.....	36
3.2 Корпуси.....	38
3.3 Світлодіодні модулі або кластери.....	41
3.4 Сучасні основні технології виготовлення світлодіодів і світлодіодних модулів.....	42
3.5 COB-технологія.....	43
3.6 SMD-технологія.....	44
3.7 Переваги світлодіодних COB-модулів.....	44
3.8 Об'ємні світлодіодні модулі.....	45
3.9 Обмеження застосування світлодіодних COB-модулів.....	51
3.10 Аналіз вартісних показників, основних параметрів матеріалів і типових плат для світлодіодних модулів.....	52
3.11 Нові підходи до створення світлодіодних модулів.....	57
3.12 Багатокристалні світлодіодні плоскі COB-модулі.....	58
4 КУТ ВИВОДУ ВИПРОМІНЕННЯ.....	61
4.1 Просторовий розподіл випромінення (діаграми спрямованості) світлодіодів.....	63
4.2 Ламбертівський розподіл випромінення.....	63

4.2.1	Світлодіоди з корпусами з епоксидної смоли .....	67
4.2.2	Покращені структури корпусів світлодіодів .....	68
4.3	Світлодіоди з кристалами різної геометрії .....	69
4.3.1	Застосування напівпровідників із текстурованою поверхнею .....	74
5	ЛЮМІНОФОРИ .....	77
5.1	Особливості технології формування люмінофорних шарів у COB світлодіодних модулях .....	83
6	ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ .....	90
6.1	Тепловий опір .....	90
6.2	Теплова модель .....	91
6.3	Аналіз кінцевих елементів .....	94
6.4	Вимірювання температури кристала .....	98
6.5	Обчислення температури кристала за тепловим опором .....	101
6.6	Проблема відводу тепла .....	101
6.7	Тепловий дизайн .....	102
6.8	Внутрішній тепловий менеджмент .....	102
6.9	Зовнішній тепловий менеджмент .....	103
6.10	Приклад симуляційної методології .....	103
7	ЕЛЕКТРИЧНІ ЛАНЦЮЖКИ СВІТЛОДІОДІВ .....	109
7.1	Живлення ланцюжків .....	112
7.2	Світлодіодні пристрої керування .....	114
7.3	Широтно-імпульсна модуляція .....	116
7.4	Електронне забезпечення світлодіодних освітлювальних систем .....	117
8	СВІТЛОДІОДНІ СВІТИЛЬНИКИ .....	127
8.1	Лінзова оптика .....	130
8.2	Дзеркальні та дифузні відбивачі .....	132
8.3	Застосування відбивачів для світлодіодного освітлення .....	137
8.4	Антивідбивальні оптичні покриття .....	138
8.5	Вибір оптичної системи .....	139
8.6	Проблеми вибору потужних світлодіодів .....	145
8.7	Методика розрахунку світильника на основі світлодіодів .....	150
8.8	Взаємозв'язок вхідних і вихідних параметрів світлодіодної системи ...	155
8.9	Термін служби світлодіодів .....	156



9 ФОТОМЕТРІЯ СВІТЛОДІОДІВ .....	158
9.1 Характеристики світлодіодів .....	158
9.1.1 Електричні та теплові характеристики світлодіодів .....	160
9.1.2 Геометричні параметри світлодіодів .....	162
9.1.3 Вимірювання оптичних параметрів світлодіодів. Фотометричні характеристики СД .....	164
9.1.4 Вимірювання сили світла (сили випромінювання) .....	165
9.1.5 Вимірювання яскравості .....	166
9.1.6 Вимірювання світлового (енергетичного) потоку .....	167
9.1.7 Вимірювання спектрального розподілу енергії випромінювання світлодіодів.....	168
9.2 Властивості світлодіодів.....	169
9.2.1 Оптичні властивості світлодіодів.....	169
9.2.2 Просторовий розподіл.....	169
9.2.3 Спектральні розподіли .....	170
9.2.4 Модель СД.....	172
9.2.5 Вихідні еталони .....	172
9.3 Режими функціонування з часовими залежностями .....	173
9.3.1 Режим модульованого струму .....	174
9.3.2 Імпульсний режим.....	174
9.3.3 Мультиплексний режим.....	174
9.3.4 Пряме падіння напруги .....	175
9.3.5 Залежність прямого падіння напруги від струму .....	175
9.3.6 Залежність прямої напруги від температури .....	176
9.3.7 Температура середовища.....	176
9.4 Вплив температури на випромінювання.....	177
9.4.1 Зміщення довжини хвилі максимуму випромінювання за змінення температури.....	177
9.4.2 Вплив температури на ККД та світлову віддачу .....	177
9.5 Технологічні відхилення.....	177
9.6 Властивості фотометрів/радіометрів.....	178
9.6.1 Фотоприймачі.....	178
9.6.2 Кутова та просторова чутливість фотометрів і радіометрів .....	179

9.6.3	Спектральна чутливість фотометрів/радіометрів.....	179
9.6.4	Фотометр для вимірювання білих СД.....	180
9.6.5	Фотометр для вимірювання кольорових (не білих) СД.....	181
9.7	Величини, які визначаються просторовими співвідношеннями .....	181
9.7.1	Нормувальний коефіцієнт і відносний просторовий розподіл .....	181
9.7.2	Вимірювання направлених величин.....	183
9.8	Усереднена сила світла СД.....	185
9.9	Вимірювання просторових і спрямованих параметрів .....	187
9.10	Вимірювання усередненої сили світла світлодіодів.....	187
9.11	Заміщення з меншою кількістю еталонів.....	188
9.12	Коригування в разі різниці у спектрах.....	188
9.13	Використання спектрорадіометра .....	189
9.14	Вимірювання світлових потоків.....	190
9.14.1	Вимірювані величини .....	190
9.14.2	Повний світловий потік .....	190
9.14.3	Частковий потік світлодіодів.....	191
9.15	Методи вимірювання потоку.....	192
9.15.1	Гоніометричний метод. Вимірювання повного світлового потоку..	192
9.15.2	Метод інтегрувальної сфери.....	194
9.15.3	Вимірювання часткових потоків СД.....	196
9.15.4	Методи калібрування сфери та подальші коригування .....	197
9.15.5	Заміщення з меншою кількістю еталонів.....	198
9.15.5.1	Використання сферичного фотометра з хорошим спектральним узгодженням.....	198
9.15.6	Застосування коригувань, пов'язаних з різницею в спектрах невідповідності.....	198
9.15.7	Вимірювання відносного спектрального коефіцієнта пропускання	199
9.15.8	Використання спектрорадіометра .....	200
9.16	Спектральні вимірювання. Концепція спектрального розподілу.	
	Спектральна густина.....	200
9.16.1	Нормувальний коефіцієнт і відносна густина спектрального розподілу .....	200
9.16.2	Параметри спетральних розподілів.....	201

9.16.3 Пікова довжина хвилі.....	201
9.16.4 Спектральна ширина смуги на рівні половини максимуму інтенсивності.....	202
9.16.5 Центральна довжина хвилі між половинними рівнями .....	202
9.16.6 Центроїдна довжина хвилі.....	202
9.16.7 Колометричні величини, які визначаються за спектральним розподілом.....	202
9.16.8 Домінантна довжина хвилі .....	203
9.16.9 Чистота (колірного стимулу).....	204
9.16.10 Спектральні вимірювання СД .....	204
9.16.11 Режим вимірювання опроміненості .....	205
9.16.12 Вимірювання усередненої сили світла світлодіодів.....	206
9.16.12 Вимірювання повних світлових потоків .....	207
9.16.13 Режим часткового потоку .....	208
9.16.14 Вимірювання часткових світлових потоків СД .....	209
9.16.15 Узгодження між смугою пропускання та інтервалом вимірювань .....	209
9.16.16 Коригування, пов'язані зі смугами пропускання .....	211
9.16.17 Інші складники в невизначеностях.....	213
9.17 Інші складники невизначеностей .....	214
<b>10 МЕТРОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ ТА ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ЇХ ОСНОВІ.....</b>	<b>215</b>
10.1 Метрологія світлодіодних освітлювальних приладів .....	219
10.2 Спектрорадіометри .....	220
10.3 Гоніофотометри.....	223
10.4 Засоби вимірювання електричних параметрів світлодіодних освітлювальних систем.....	225
10.5 Тепловізійні засоби вимірювання .....	228
<b>ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ .....</b>	<b>233</b>
<b>ОБОВ'ЯЗКОВІ ТА ДОДАТКОВІ ЗАДАЧІ Й ПРИКЛАДИ .....</b>	<b>236</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>239</b>
<b>ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК.....</b>	<b>244</b>
<b>ДОДАТОК А .....</b>	<b>249</b>
<b>ДОДАТОК Б.....</b>	<b>250</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

**CFD** (Computational Fluid Dynamics) – пакет для автоматичного визначення критерію збіжності

**CRI** – індекс передавання кольору

**IESNA** (Illuminating Engineering Society of North America) – це неприбуткова організація, яка розробляє та публікує стандарти щодо освітлення

**NTSC** – колірний стандарт

**OLED** – органічний світлодіод

**SMD** технологія (surface montage details) – поверхневий монтаж деталей

**sRGB** – стандарт вимірювання кольоропередачі

**VAX** – вольт-амперна характеристика

**ЕСК** – електронна схема керування

**ІЧ** – інфра-червоний

**ККД** – коефіцієнт корисної дії

**КП** – коефіцієнту потужності

**КСС** – крива сили світла

**МКО** – Міжнародний комітет з освітлення

**НМІ** – Національний метрологічний інститут

**ПК** – пристрої керування

**СД** – світлодіод

**СДМ** – світлодіодний модуль

**СОВ** технологія (chip on board) – технологія виготовлення світлодіодів

**ШІМ** (або в англійській транскрипції PWM – Pulse Width Modulation) – широтно-імпульсна модуляція

## ВСТУП

Вогонь став слугувати людям п'ятсот тисяч років тому. Сімдесят тисяч років тому людство почало запалювати масляні лампади. Три тисячі років тому – воскові свічки. У XVIII сторіччі з'явилося газове освітлення. Великі наукові відкриття у фізиці, перші теорії електрики були зроблені у XIX сторіччі.

На їх основі з 1838 по 1878 рр. було запропоновано більше двадцяти винаходів для електричного освітлення.

Лампі розжарення з вольфрамовою ниткою – лампі Томаса Едісона (1879 р.) – понад сто сорок років.

Технічна революція в освітленні завдяки лампам розжарення кардинально змінила суспільне життя промислово розвинутих країн.

У XX сторіччі виникнення квантової механіки й розвиток оптики твердого тіла призвело до створення люмінесцентних ламп. Для їх удосконалення за сімдесят років були розроблені сотні винаходів.

Частина електричної енергії, що використовується зараз у світі для освітлення, це приблизно дев'ятнадцять відсотків від загального обсягу. Якщо нові джерела світла будуть ефективніші й мати довгий строк придатності, ніж традиційні лампи, можливо буде заощадити приблизно половини цієї енергії вартістю у сотні мільярдів доларів.

Підвищенню енергоефективності у всьому світі в даний час приділяється багато уваги. Енергоефективність є одним з ключових аспектів будь-якої економічної діяльності.

Вимоги до її підвищення встановлюються навіть законодавчо багатьма державами з метою збереження ресурсів. Світлодіодне освітлення найефективніше в порівнянні з традиційними джерелами світла, його впровадження є пріоритетним напрямком розвитку. Поява нового ринку – ринку світлодіодних пристроїв для освітлювальних цілей, стало можливим завдяки істотному прогресу в світлодіодних і супутніх їм технологіях. Ефективність потужних світлодіодів і світловипромінювальних елементів світильників досягла порівнянних значень з ефективністю інших існуючих енергоефективних джерел білого світла. Успіхи в створенні джерел живлення для світлодіодного освітлення більш ніж на 90% і більше, в забезпеченні теплового режиму, у виробництві ефективних оптичних систем послужили створенню нових високотехнологічних джерел світла і формуванню ринку світлодіодного освітлення.

## 1 РОЗВИТОК СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ

Якщо запитати людину на вулиці, що можна вважати сучасним освітленням, він, швидше за все, скаже, світлодіоди. І дійсно, світлодіодне освітлення останнім часом отримало неймовірне поширення і продовжує замінювати менш ефективне на все нових теренах.

Світлодіоди прийшли на зміну вважаються найбільш енергозберігаючою технологією люмінесцентним лампам. І не без причини. Світлодіоди володіють сильним світловим потоком, надійністю і надзвичайною енергоефективністю. Показники якості світла у світлодіодних джерел освітлення мінімум в два рази вище, ніж у найближчих конкурентів – люмінесцентних. При цьому світлодіоди довго зберігають світловий потік, в той час як у інших типів ламп він змінюється вже протягом першого року використання. Світлодіодне освітлення також більш економічно не тільки з точки зору витрат електроенергії, а й в питаннях обслуговування і заміни. Термін служби світлодіодних досить високий.

Світлодіодне освітлення – один з найбезпечніших варіантів. Як з точки зору складу (в світлодіодних світильниках і лампах немає ртуті, фосфору), так і з точки зору людського організму. Світло якісних світлодіодних джерел комфортний для очей, не перевищує допустимого рівня пульсації і відповідає звичному діапазону колірних температур. Крім того, світлодіодне обладнання не може перевантажити електромережу в момент включення.

Світлодіодне освітлення легко піддається програмуванню і управлінню як безпосередньо, так і дистанційно. Це відкрило нові можливості у використанні світла в приміщеннях, в тому числі і дизайнерські, а також дало додаткову економію і комфорт. Саме світлодіодний напрямок сьогодні активно розвивається. Виробники шукають способи поліпшити і без того відмінні характеристики світлодіодних ламп і світильників. Також роботи активно ведуться і в технологіях виробництва самих світлодіодів.

Далеко не останню роль в сучасних технологіях освітлення зіграла гонка за енергозбереженням. Цим же і пояснюється зростаюча популярність застосування світлодіодів в різних сферах. Розвиток виробництва безпосередньо світлодіодних джерел освітлення має два основних напрямки: 1) технологія і матеріали виробництва самих світлодіодів, 2) розвиток технічних аспектів світлодіодних пристроїв.

## 1.1 Із історії освітлення

Присутність світла є критичною для надання можливості людині ефективно взаємодіяти з оточенням.

З огляду на це, джерела світла були ключовими технологіями протягом усєї історії людства. Очевидно, що люди спочатку спиралися на світло від сонця та меншою мірою на сонячне світло, відбите місяцем (зоряним світлом можна було нехтувати). Коли ці природні джерела світла були неможливі, наш зір був істотно обмежений. Приведені в рух такі необхідності, як безпека, захист, продуктивність дали поштовх розвитку нових методів генерації світла. Первинна людина могла бути спочатку обмежена вогнем від природних явищ, проте, за деяких обставин, могла прийти майстерність через засоби створення полум'я самостійно. Визволення енергії, яке супроводжує процес горіння, забезпечувало енергію, щоб викликати розжарення й забезпечити світло, разом із такими перевагами, як тепло для приготування їжі. Із розуміння розвинених різноманітних твердих палив прийшли способи створення смолоскипів, які горіли яскраво в компактній і мобільній формах. Через тисячоліття це було відпрацьовано та стало лампою. Археологічні докази свідчать, що це розвивалося принаймні 70 000 років тому й спочатку складалося із видовбаної в камені порожнини, заповненою поглинальним матеріалом, таким як мох просякнутий тваринним жиром [1]. Створене джерело світла більш піддається керуванню та легко позиціонується. Лампові конструкції розвивалися протягом віків, відображаючи матеріали, що використовуються, і удосконалення виробничих методів. Відкриття свічки прийшло остаточно близько 3 000 до нашої ери [2], використовуючи твердий віск як джерело палива. Набагато пізніше прийшов газ як джерело палива, який знайшов широке застосування в ранньому вуличному освітленні [1].

Ці технології постійно вдосконалювались і покращувались. Неперервно шукалися менш забруднюючі, практичніші й ефективніші концепції, які сприяли допоміжному розвитку. Різноманітність оптичних елементів, таких як рефлектори й лінзи, допомагали покращити розподіл світла. Подібно досягненням в газових і масляних лампах, покращувати світність полум'я, стабільність і ефективність було виконано з часом.

Досягнення в хімії та фізиці привели до нових досягнень у покращенні вихідних величин, таких як газовий ореол, перша ефективна відтворюваність, яка була продемонстрована в 1800 р. [3]. Він уміщував різноманітні суміші, які в разі введення в полум'я могли випромінювати яскраве біле світло, значно покращуючи ілюмінацію. Відкриття того, що нагрівання оксиду кальцію (непогашене вапно) в кисневоводневому полум'ї призводить до неймовірно

інтенсивного світла, відкрило нові можливості. Це «Вапняне світло» застосовувалось у загальному освітленні, проте зазвичай використовувалось у театрі, і на стадії освітлення, де інтенсивний і контрольований вихідний світловий сигнал був надзвичайно корисним. Проте апарати, які потребувалися, не мали достатніх якостей, щоб працювати для загальних цілей застосувань, так що необхідно було звертатись до альтернативних технологій.

Джерела світла обговорювалися достатньо давно всіма тими, хто спирається на згорання, як на засіб визволення енергії, необхідної для отримання світла. Ці визволення виявляють і інші забруднювальні домішки як сторонні продукти. Вони також потребують постійного постачання палива та є внутрішньо ризикованими.

Близько початку ХІХ сторіччя прийшла ера електрики як потужного джерела, яка запропонувала нові можливості обійти ці проблеми.

Сер Хамфрі Даві (Humphry Davy) започаткував демонстрацію потенційних можливостей електричної генерації світла. Один із методів використовував струм, який проходив між двома відокремленими вугільними електродами. Електрична дуга, будучи сформована між ними, робить міжелектродне повітря електролюмінісцентним й водночас приводячи електроди до розжарення за рахунок виділяемого тепла. Водночас Даві продемонстрував використання електрики для створення світла при проходженні струму через тонку платинову стрічку. Завдяки опору до проходження струму спостерігалось внутрішнє нагрівання, яке викликало розжарення металічної стрічки. Ці концепції сформували основу двох головних освітлювальних технологій наступних двох сторіч.

У 1850 рр. концепція дугового світла була першою, яка проявила себе як комерційно життєздатне джерело світла. Висока світлова вихідна величина зробила його ідеальним для використання в прожекторах, проєкторах.

Відповідно до Баверс (1998) [5], який описує цей час, відзначено зразки дугового світла, які могли випромінювати з ефективністю 11,8 лм/Вт, хоча трактування точності таких стверджень повинно бути із певним скептицизмом.

Високий світловий потік дугового світла надавав можливості, які добре підходили для вуличного освітлення. Історія розвитку дугового світла відзначається покращенням часу дії шляхом мінімізації споживання електродів і введенням нових матеріалів для підвищення світлового виходу джерела. Ця світлова технологія використовувалась у Другій Світовій Війні в протилітакових прожекторах і вуличному освітленні. Проте їхній потенціал був істотно обмежений високим споживанням електричної енергії, теплом, яке виділяється, і пов'язаним ризикованим випроміненням.



Альтернативна лампа зі стрічкою розжарення потребувала більшого часу для розвитку, проте безумовно знайшла ширше застосування. Багато імен пов'язані з її розвитком з часу її першої демонстрації. Найвідоміші були Томас Едісон і сер Джозеп Свон (ЕВ, 2010 с) [3]. У 1881 році лампа розжарення демонструвалася в Парижі на Всесвітній виставці. Наступний розвиток сприяв появі лампи розжарення, як вона відома сьогодні: тонка стрічка звернута в спіраль, поміщена в інертний газ, який заповнює колбу. Ця конструкція є достатньо простою та створює дуже чисте, практичне й постійне світло. Проте механізм генерації все ще потребує дуже високих температур. Це робить її внутрішньо неефективною, оскільки більшість споживаної енергії розсіюється як тепло, тоді як тільки малий відсоток (приблизно 2 %, табл. 1.1) перетворюється в корисне світло.

За електричного розряду через газ деякі атоми можуть стати іонізованими. У присутності електричного поля ці іони прискорюються в напрямку до розрядного електрода протилежного знаку, збільшуючи в процесі енергію. У процесі руху іон може зіткнутися з нейтральним атомом, переносячи заряд і повертаючись до нижчого енергетичного стану. При цьому енергія може бути випромінена у формі електромагнітного випромінення (ЕВ, 2012 d) [4]. Властивості газу й електричне поле впливають на випромінене світло, забезпечуючи випромінення світла і забезпечуючи низку можливостей. Це явище було вперше зареєстроване Джином Пікдромом у 1675 р. (ЕВ, 2012 e) [6] і тепер головним чином формує основу лампи газового розряду. Як значилось у [5], ранні комерційні версії показали високу ефективність і, отже, нижчу експлуатаційну вартість, ніж лампа розжарення в той час (ранні 1900 роки). Отже, до цього була прикута значна увага в дослідженнях. Подальші досягнення прийшли, коли було відкрито невелику кількість металів, які могли випаровуватись уздовж газу для змінювання спектру емісії. Натрій і ртуть стали тими металами, які найпростіше використовувались для цих цілей. Натрієві газорозрядні лампи могли давати істотно високу ефективність, проте виробляли майже монохроматичне жовте світло.

Вони стали широко розповсюдженими у вуличному освітленні, де якість світла не була високим пріоритетом. Ртутні газорозрядні лампи широко розповсюдились в загальному освітленні. Вони випромінювали світло майже в повністю невидимому ультрафіолетовому (UV) діапазоні електромагнітного спектру. Для створення білого світла вони поєднувались із матеріалом, який поглинав випромінення й перевипромінює на видимих довжинах хвиль за допомогою люмінесценції. Оскільки вони зазвичай відомі як люмінесцентні лампи. Упровадження люмінесцентної лампи було спочатку повільним, завдяки невисокій якості випромінюваного світла, її тенденції до миготіння, високої

вартості встановлення як результат її несумісності з існуючими пристроями. Газорозрядним лампам властивий цикл підігрівання, перше ніж досягнути повний світловий вихід. Хоча стандарти потребують поточних газорозрядних ламп досягти 60 % повного світлового виходу впродовж 60 секунд (European Commission, 2009), це все ще обмежує їхню функціональність.

Фінальне технологічне досягнення, яке відмічається як варіація газорозрядної лампи, зазвичай відоме, як без електродна плазмова або індукційна лампа, щоб відрізнити її від стандартних газорозрядних ламп. Рання версія цієї концепції була запатентована Ніколою Тесла (Nikola Tesla) в кінці XIX сторіччя [7]. Порівнюючи з газорозрядною лампою, яка обговорювалася вище, вони все ще використовують електролюмінесценцію газу в заповненому контейнері, проте видаляють електроди до навколишнього середовища. Збудження газу досягається шляхом застосування електромагнітного поля від зовнішнього джерела. Морган (2009) [7] відмічав вимоги провідних виробників високої ефективності (більше 100 лм/Вт), значного часу дії (понад 40 000 годин) і компактності.

Коли ми розглядаємо історію цих джерел світла, стає очевидним тренд в напрямку підвищення ефективності (див. табл. 1.1). Проте все значне розходження між технологіями з кращими характеристиками світлового виходу й теоретичним максимумом ефективності. Ці технології добре впровадженні в промисловості.

Отже, вони досягли досконалості: вони технологічно відпрацьовані, так що є дуже малий потенціал для їхнього покращення.

Таблиця 1.1 – Ефективність різних джерел світла

Джерело світла	Ефективність (лм/Вт)
Свічка	0,2 – 0,22 <sup>1</sup>
Керосинова фітільна лампа	0,05 – 0,21 <sup>1</sup>
Вольфрамова лампа розжарення	12 – 20 <sup>2</sup>
Вольфрамова галогенна лампа	252
Компактна люмінесцентна лампа	43 <sup>2</sup>
Люмінесцентна трубка	64
Натрієва газорозрядна лампа високого тиску	90
Натрієва газорозрядна лампа низького тиску	143
Монохроматичне джерело світла (555 нм довжина хвилі) [8]	683 (Теоретично максимум)
Біле джерело світла (ККТ 5000 К, CRI 85) [9]	365 (Теоретично максимум)

Щоб закрити розходження між теоретичним максимумом і реалізувати необхідні технічні характеристики, необхідно рухатися до нових технологій, таких як світлодіоди. Світлодіоди (англійське скорочення – LED, Light Emitting

Diodes) – це напівпровідникові прилади, котрі при протіканні струму випромінюють світло.

Американський інженер Генрі Джозеф Раунд уперше спостерігав блакитнувате світіння напівпровідника – карбїду кремнію (SiC) при протіканні струму через точковий контакт у 1907 р.

О. В. Лосєв проводив дослідження детекторів радіоприймачів із SiC у Нижегородській лабораторії у 20-ті роки минулого сторіччя. Він виявив випромінення у контактах як при прямій, так і при зворотній напрузі і довів, що воно не пов'язано з нагріванням напівпровідника. Він показав, що найяскравіше світіння спостерігається у напівпровіднику поблизу границі зон із дірковою (p-) і електронною (n-) провідністю. Цей ефект називається у європейській літературі «ефектом Лосєва».

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

Як тільки стала зрозуміла можливість ефективного випромінення в діодах із GaAs (арсенїду галію), почалися пошуки видимого випромінення. Перші червоні світлодіоди з арсенїду-фосфїду галію (GaAsP) були зроблені Ніком Холоньяком (який має українське коріння) в 1961 р. в університеті Іллінойсу в Шампейн, і фірма «General Electric» почала їх промисловий випуск. Однак вони мали порівняльно низьку ефективність.

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

Яскраві світлодіоди, що випромінюють у всій видимій області спектра дали можливість появи світлодіодних джерел білого світла. На початку ХХІ століття стало зрозуміло, що світлодіоди стануть новими, набагато ефективнішими джерелами світла, що вони в майбутньому зможуть замінити лампи розжарення й люмінесцентні лампи. На рисунку 1.1 проілюстровано, як змінилася світлова віддача різних джерел світла з 1940 по 2010 роки.

Виробництво світлодіодів і світлодіодне освітлення розвивалося бурхливими темпами, випереджаючи сміливі прогнози фахівців. Були вирощені складні напівпровідникові структури – десятками шарів товщиною порядку нанометрів. Були розроблені нові типи світлодіодів і світлодіодні лампи, з'ясовані сфери їхнього застосування. Паралельно з дослідженнями світлодіодів із неорганічних напівпровідників йшли дослідження та розробки органічних світлодіодів (OLED), які почали застосовуватися в освітленні.

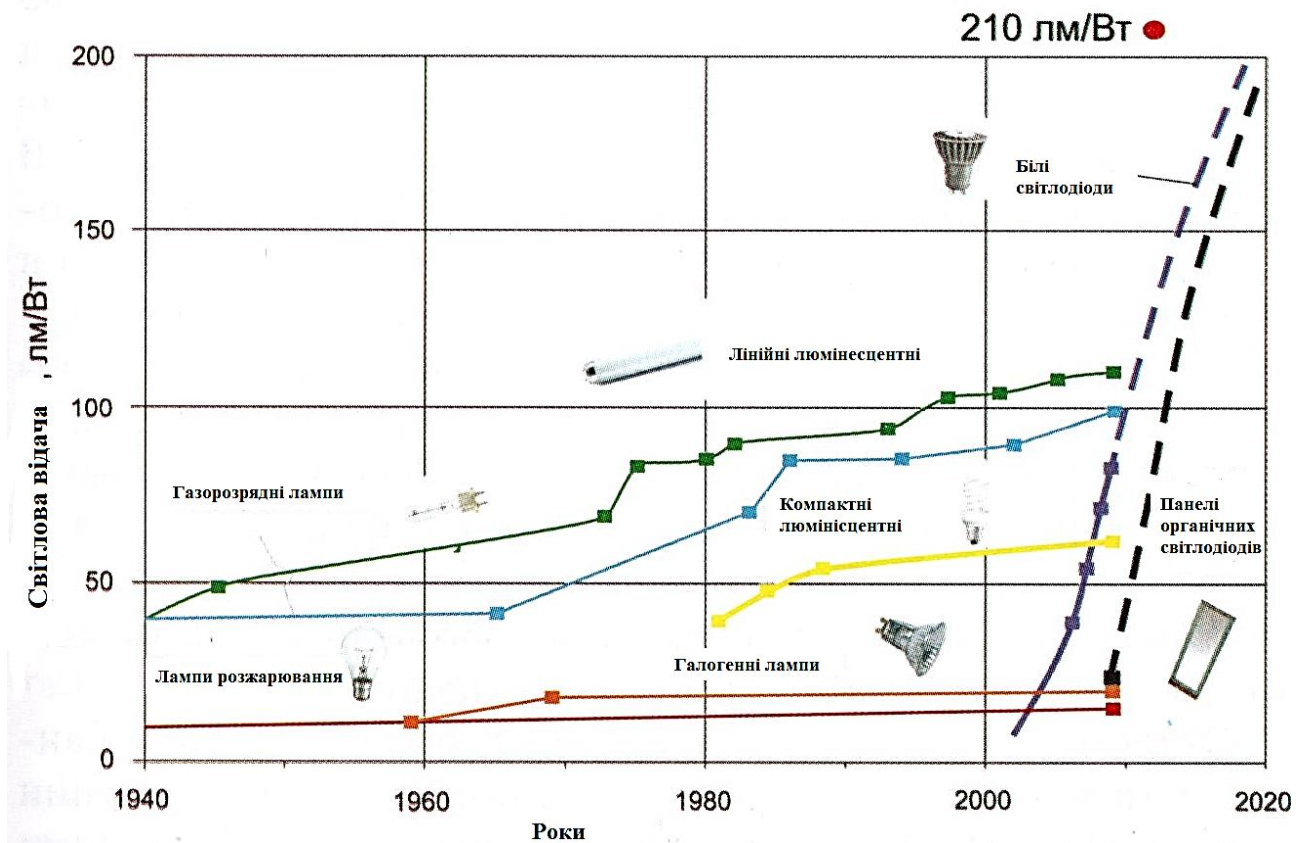


Рисунок 1.1 – Динаміка зміни світлової віддачі різноманітних джерел світла в часі (з 1940 по 2010 рр.) і перспективи до 2020 р. Червона точка – рекордне значення для білих світлодіодів у лабораторіях у 2011 р.

Створення, розвиток і застосування освітлення, заснованого на використанні світлодіодів, матиме великі позитивні, економічні й соціальні наслідки. Розуміння цього призвело до розробки державних програм світлодіодного освітлення [9].

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

У 2002 р. група вчених і інженерів у Каліфорнії розробила американську програму (Solid Stated Lighting, SSL). Економічні перспективи світлодіодного освітлення були охарактеризовані так: «Якщо до 2020 р. буде проведена заміна ламп розжарення світлодіодами, отримана економія електроенергії буде еквівалентна можливості відмовитися від будівництва 100 атомних електростанцій і скоротити викид продуктів згоряння 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 в наступній п'ятирічці (2006–2010 рр.) розвиток світлодіодної промисловості в Китаї дозволило йому

вийти на одне з перших місць у світі за обсягом продукції, що випускається світлотехнічною промисловістю зі світлодіодами.

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

В Європейському Союзі була прийнята програма «Фотоніка XXI століття», помітну частину якої займає програма світлодіодного освітлення.

В Україні: «Національна програма створення світлодіодних джерел світла» 2009–2015 рр.

2015 рік – Всесвітній рік світла і світлових технологій.

Присудження Нобелівської премії японським фізикам за створення синіх світлодіодів – 2015 рік.

Сотні мільйонів доларів, вкладені в дослідження й розробку світлодіодів у Японії, США, Кореї, Китаї в перші роки XXI століття, через 5–6 років почали окупатися. Ринок потужних світлодіодів (далі – СД) досяг 1 млрд дол. у 2012 р., у 2020 – 2 млрд дол., а в кращому випадку зросте до 6,5 млрд дол.

## **1.2 Порівняння властивостей білих світлодіодів зі звичайними джерелами світла**

Рекордні значення світлової віддачі білих СД досягли в 2011 р. – 210 лм/Вт, а в 2012 р. – 254 лм/Вт, значення для кращих комерційних СД досягло 120 лм/Вт.

У 2015 році компанія CREE (США) заявила про перші зразки білих світлодіодів з ефективністю в 303 лм/Вт. За оцінками фахівців, фізична межа ефективності становить 365 лм/Вт (табл. 1.2 і 1.3).

Світлодіоди, як твердотільні прилади, що працюють при температурах, близьких до кімнатної, мають значно більший термін служби, ніж лампи розжарення та люмінесцентні лампи. Оцінка терміну служби СД при нормальних режимах дають значення 50 тис. годин (табл. 1.4). Вони мають малі розміри, але частина електричної енергії (навіть при ККД близько 50 %) йде на нагрів. Підвищення температури призведе до падіння світлової віддачі (рис. 1.2).

Отже в конструкції СД використовуються корпуси, що забезпечують хороший тепловідвід. Це дає змогу збільшити струм через діод і, отже, збільшити світловий потік. СД на відміну звичайних ламп не перегорають, а поступово зменшують свою ефективність. Термін служби визначається падінням інтенсивності випромінювання, наприклад, до 70 % від початкового значення.

Ще одна перевага СД – вібростійкість.

Світлодіоди не містять ртуті, свинцю та інших важких металів, що важливо для безпечної експлуатації, та не вимагає утилізації пошкоджених приладів.

Таблиця 1.2 – Світлова ефективність і ефективність різних джерел світла<sup>1</sup>

Джерело світла	Тип	Світлова ефективність (лм/Вт)
Розжарення	40 Вт вольфрамова розжарення (120 V)	12,8
	100 Вт вольфрамова розжарення	17,5
	Кварцова галогенна (12–24 V)	24
Люмінесцентне	9–26 Вт компактна люмінесцентна	57–72
	T8 трубка з магнітним баластом	80–101
НІР	Металогалогенна	65–115
LED	Потужні білі LED	115

Таблиця 1.3 – Перетворення потужності джерел світла<sup>a</sup>

	Розжарення (60 Вт)	Люмінесцентна типова	Метало-галогенна	LED
Видиме світло	8 %	21 %	27 %	15–25 %
Інфрачервоне	73 %	37 %	17 %	0 %
Ультрафіолетове	0 %	0 %	19 %	0 %
Повна радіаційна енергія	81 %	58 %	63 %	15–85 %
Загальне	100 %	100 %	100 %	100 %

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

<sup>1</sup>Wikipedia «Light-emitting diodes» : [https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting\\_diode](https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode)

Таблиця 1.4 – Час життя різних джерел світла<sup>2</sup>

Джерело світла	Границі типових часів життєвих циклів (у годинах)
Лампи розжарення	750–2 000
Галогенне розжарення	3 000–4 000
Компактні люмінесцентні лампи	8 000–10 000
Металогалогенні лампи	7 500–20 000
Лінійні люмінесцентні лампи	20 000–30 000
Потужні білі LED (встановлене корисне життя) за $L_{70}$	35 000–50 000

Площа кристалів СД становить близько  $1 \text{ мм}^2$ , це майже точкові джерела світла. Лінзи та відбивачі з СД створюють випромінювання в заданому тілесному куті ( $3\text{--}120^\circ$ ). Це дає змогу ефективно використовувати світловий потік для освітлення необхідної частини простору.

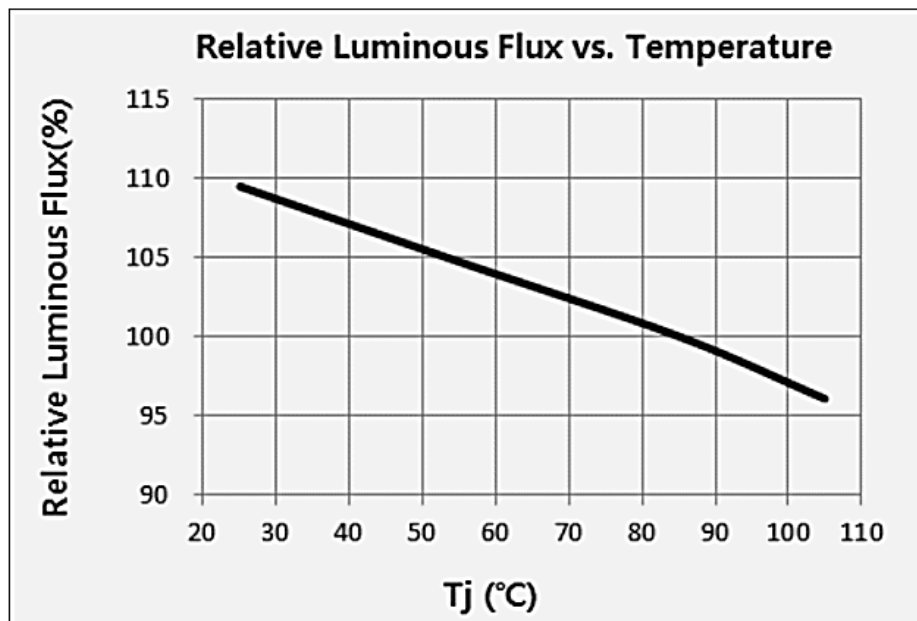


Рисунок 1.2 – Отримане зменшення світлового потоку, що випромінюється при більш високій температурі переходу світлодіода (Samsung, 2016 а)

Можливість керувати як інтенсивністю, так і спектром випромінювання. Люмінофори для білих СД, збуджені синім випромінюванням кристала дають змогу створювати світлодіоди «холодного» (тобто яскравого денного) світла з корельованою колірною температурою ( $T$ ) близько  $6\,000 \text{ К}$ , «нейтрального» – з  $T_{\text{цв}} \approx 4\,000 \text{ К}$ , «теплого» (тобто вечірнього, близькому до кольору лампи розжарення з  $T_{\text{цв}} \approx 3\,000 \text{ К}$ ). Розроблені освітлювачі з програмним забезпеченням.

<sup>2</sup>«US department of energy SSL» : <https://www.energy.gov/eere/ssl/solid-state-lighting>

## 2 ПРИНЦИП ДІЇ СВІТЛОДІОДІВ

### 2.1 Електролюмінесценція

Електролюмінесценція – світіння речовини під час прикладання різниці потенціалів і протікання електричного струму.

Саме останнє явище й лежить в основі світлодіода. Під час протікання через нього електричного струму в прямому напрямку носії заряду – електрони й дірки – рекомбінують із випроміненням квантів світла – фотонів. Перетворення енергії відбувається внаслідок того, що в напівпровідникових діодах із *p-n*-переходами під час протікання струму збуджуються (інжектуються) електронно-діркові пари. Для відновлення рівноваги електрони й дірки рекомбінують – віддаючи частину енергії збудження фотонам. Випромінювальна рекомбінація в *p-n*-переходах також називається інжекційною електролюмінесценцією. Зазвичай випромінюване світло лежить у вузькому діапазоні спектра, його колір світіння визначається довжиною хвилі випромінення, яка залежить від хімічного складу речовини напівпровідника.

### 2.2 Оптичні й електричні властивості світлодіодів

Світло поглинається кристалом напівпровідника, якщо енергія кванта світла ( $\hbar \cdot \omega$ ) дорівнює або більше ширини забороненої зони  $E_g$  (власне поглинання). Під час поглинання квант світла збуджує електронно-діркові пари. Це – випадок оптичного збудження напівпровідника. Збудження може бути здійснено також електронним пучком із достатньо великою енергією, а також електричним струмом.

Найцікавіше для практики збудження струмом, яке ми розглянемо пізніше.

У разі оптичного збудження напівпровідника при поглинанні кванта світла з енергією ( $\hbar \cdot \omega_2 > E_g$ ) виникає перехід електрона із валентної зони в зону провідності. Отже, в зоні провідності з'являється допоміжний електрон, а у валентній зоні утворюється дірка. У процесі руху обох носіїв по кристалу може виникнути їхня рекомбінація, яка супроводжується виділенням енергії  $\hbar \cdot \omega_1 \geq E_g$ .

У більшості випадків  $\hbar \cdot \omega_2 > \hbar \cdot \omega_1$ , оскільки частина придбаної електроном енергії втрачається в разі взаємодії з кристалічною решіткою (фононами) в процесі релаксації в зоні провідності й аналогічно втрата енергії виникає і в дірці у валентній зоні [10].



Рекомбінація електронів і дірок у напівпровідниках може бути випромінювальною, тобто з випроміненням фотонів, і безвипромінювальною. У випромінювальних пристроях переважаючим є перший тип рекомбінації. Проте на практиці безвипромінювальну рекомбінацію ніколи не вдається звести до нуля. Отже, в напівпровідниках завжди виникає конкуренція між видами рекомбінації.

Незалежно від того, чи є напівпровідник легованим чи ні, в ньому завжди є обидва типи вільних носіїв: електрони й дірки. В умовах рівноваги, тобто коли на матеріал не має зовнішнього впливу, такого як дія світла й електричних полів, виконується закон діючих мас, який означає, що добуток концентрацій і дірок при заданій температурі є константою, тобто

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2, \quad (2.1)$$

де  $n_0$  і  $p_0$  – рівноважні концентрації електронів і дірок;

$n_i$  – власна концентрація.

Цей закон справедливий тільки для невідроджених легованих напівпровідників.

Надлишок носіїв у напівпровідниках створюється або під час поглинання фотонів, або під час інжекції в матеріал електронів. Сумарна концентрація носіїв дорівнює сумі їхніх рівноважних концентрацій і концентрацій відповідних надлишкових носіїв, тобто

$$\begin{aligned} n &= n_0 + \Delta n; \\ p &= p_0 + \Delta p, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де  $\Delta n$  і  $\Delta p$  – концентрації надлишкових електронів і дірок.

Нехай концентрації акцепторів  $N_a$ , концентрації донорів  $N_d$ . Для простоти вважатимемо що  $N_a = N_d$  і дорівнює, наприклад  $10^{23} \text{ м}^{-3}$ . Для  $n$ -області основними носіями є електрони, для  $p$ -області – дірки. Основні носії виникають майже цілком унаслідок іонізації донорних і акцепторних домішок. При не дуже низьких температурах ці домішки іонізовані практично повністю, внаслідок чого концентрації електронів в  $n$ -області ( $n_{n0} \approx N_d$ ) можна вважати практично рівній концентрації донорів атомів  $N_d$  ( $n_{n0} \approx N_d$ ) а концентрацію дірок у  $p$ -області ( $p_{p0} \approx N_a$ ). Крім основних носіїв, ці області містять неосновні носії:  $n$ -область – дірки ( $p_{n0}$ ),  $p$ -область – електрони ( $n_{p0}$ ). Їхню концентрацію можна визначити, користуючись законом діючих мас:

$$n_{n0} \cdot p_{n0} = p_{p0} \cdot n_{p0} = n_i^2, \quad (2.3)$$

де  $n_i$  – концентрації носіїв у власному напівпровіднику.

При  $n_{no} = p_{po} = 10^{22} \text{ м}^{-3}$  і  $n_i = 10^{19} \text{ м}^{-3}$  отримуємо  $p_{no} = n_{po} = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ . Концентрації дірок у  $p$ -області на шість порядків вище їх в  $n$ -області, концентрація електронів в  $n$ -області на шість порядків вище концентрації їх в  $p$ -області.

Уявлення про структуру  $p$ - $n$ -переходу дає його схематичне зображення (рис. 2.1).

Після того як області приведені в контакт, починається дифузія електронів через контактний шар із  $n$ -області, де їхня концентрація більше, в область із меншою концентрацією електронів (в  $p$ -область), тобто зліва направо на рисунку 2.1.

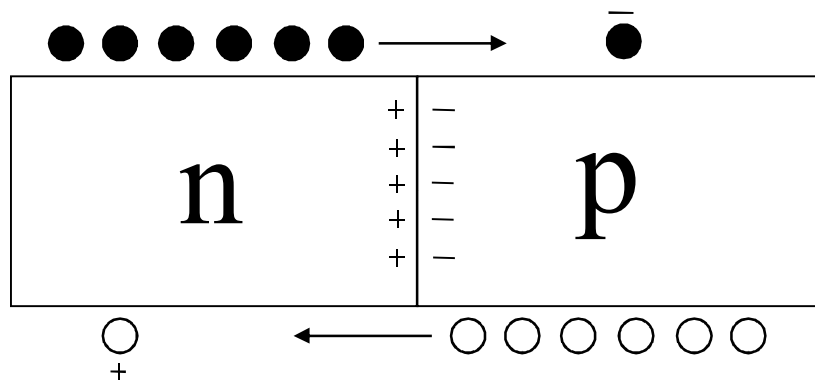


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення  $p$ - $n$ -переходу в напівпровіднику

У процесі того, як електрони полишають  $n$ -область, у ній йде утворення позитивно заряджених іонів донорної домішки. Їхній заряд вже не скомпенсований зарядом електронів у зоні провідності  $n$ -області напівпровідника, оскільки частина електронів «пішла» із неї в  $p$ -область.

Можна уявити собі й аналогічний процес, що проходить із дірками, які дифундують через суміжний шар в оберненому напрямку (хоча, зрозуміло, в дійсності й у цьому разі реально дифундуючими частинами є електрони). Його результатом буде виникнення в  $p$ -області від'ємних заряджених і не скомпенсованих акцепторних домішкових іонів [11].

Для того щоб кристал прийшов до рівноважного стану, надлишкові («знову прибульці») електрони та дірки в кожній із областей дифундують до контактної границі й розподіляються поблизу неї, утворюючи подвійний шар зарядів: шар від'ємних зарядів в  $p$ -області й шар позитивних зарядів в  $n$ -області.

Після того як кристал прийшов до рівноважного стану, електричне поле в просторі між утвореними шарами зарядів (у пограничному шарі) протидіє подальшій дифузії носіїв заряду із області, де вони є основними, в іншу

область, потрапляючи в яку вони стають вже неосновними (для цієї області) носіями заряду. Ця перешкода на шляху носіїв заряду називається контактним потенціальним бар'єром, або контактною різницею потенціалів. Висота бар'єра становить зазвичай десяту частину вольтів.

Область  $n$ , із якої дифундували електрони, заряджується позитивно, область  $p$ , із якої дифундували дірки – від'ємно. Це зарядження приводить відповідно до пониження всіх електричних рівнів, зокрема й рівня Фермі в  $n$ - області і підвищення їх в  $p$ -області. Перетікання електронів справа наліво й дірок зліва направо проходить доти, доки поступово рівень Фермі, що піднімається в  $p$ -області ( $\mu_p$ ) не встановиться на одній висоті з рівнем Фермі, що поступово опускається в  $n$ -області ( $\mu_n$ ). Із встановленням цих рівнів на одній висоті між  $n$ - і  $p$ -областями встановлюється рівновага, за якої потік електронів із  $n$ - в  $p$ -область ( $n_{n \rightarrow p}$ ) урівноважується потоком електронів із  $p$ - в  $n$ -область ( $n_{p \rightarrow n}$ ), а також дірок із  $p$ - в  $n$ -область ( $p_{p \rightarrow n}$ ) урівноважується потоком дірок із  $n$ - в  $p$ -область ( $p_{n \rightarrow p}$ ).

$$n_{n \rightarrow p} = n_{p \rightarrow n}; p_{p \rightarrow n} = p_{n \rightarrow p}.$$

Вихід електронів із приконтактного шару  $n$ -області приводить до виникнення в цьому шарі нерухомого позитивного об'ємного заряду іонізованих атомів донорної домішки. Позначимо товщину цього шару через  $d_n$ . Вихід дірок із приконтактного шару в  $p$ -області сприяє появі в цьому шарі нерухомого від'ємного заряду, локалізованого на атомах акцепторної домішки – позначимо товщину цього шару через  $d_p$ . Між цими шарами виникає контактна різниця потенціалів  $V_k$ , яка створює в  $p$ - $n$ -переході потенціальний бар'єр  $\phi_o$ , який перешкоджає переходу електронів із  $n$ - в  $p$ -область і дірок із  $p$ - в  $n$ -область.

З розрахунку маємо:

$$\phi_o = k \cdot T \cdot \ln \frac{n_{no}}{p_{po}} = k \cdot T \cdot \ln \frac{p_{po}}{n_{no}}, \quad (2.4)$$

де  $k$  – стала Больцмана.

Із (2.4) бачимо, що  $\phi_o$  тим вище, чим більше відношення концентрації основних носіїв в області напівпровідника до концентрації цих носіїв у другій області напівпровідника, в якій вони є неосновними. При  $n_{no} = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ,  $n_{po} = 10^{16} \text{ м}^{-3}$  і  $T = 300 \text{ К}$ ,  $\phi_o \approx 0,45 \text{ еВ}$ .

Якщо прикласти до напівпровідникового кристала зовнішню напругу, то в ньому появиться направлене електричне поле. У пограничному шарі воно додається до поля потенціального бар'єра, утвореного шарами зарядів, складається з ним, і висота бар'єра зміниться (збільшиться або зменшиться залежно від взаємного напрямку полів). Ця зміна призведе до порушення рівноваги потоків основних і неосновних носіїв через бар'єр.

Якщо позитивний потенціал джерела допоміжного зовнішнього поля прикладений до  $p$ -області, а від'ємний до  $n$ -області, то напрямок зовнішнього поля стає протилежним напрямку поля, утвореного шарами зарядів і висота потенційного бар'єра зменшується. Така зміна бар'єра називається *прямим зміщенням*.

При прямому зміщенні кількість основних носіїв, які долають бар'єр, зростає. Носії, які потрапляють із однієї області в іншу, із основних із попередньої області перетворюються в неосновні для нової, проникаючи на глибину, яка визначається рекомбінаційними процесами. Цей процес називається *інжекцією*. Інжекція неосновних носіїв через потенційний бар'єр при прямому зміщенні лежить в основі дії низки приладів.

Інжекція носіїв через бар'єр приводить до збільшення концентрації неосновних носіїв як в  $p$ - , так і в  $n$ - областях. Одночасно через контакти, до яких прикладена зовнішня напруга в ці області напівпровідника надходить така сама кількість основних (для кожної області) носіїв. Вони компенсують

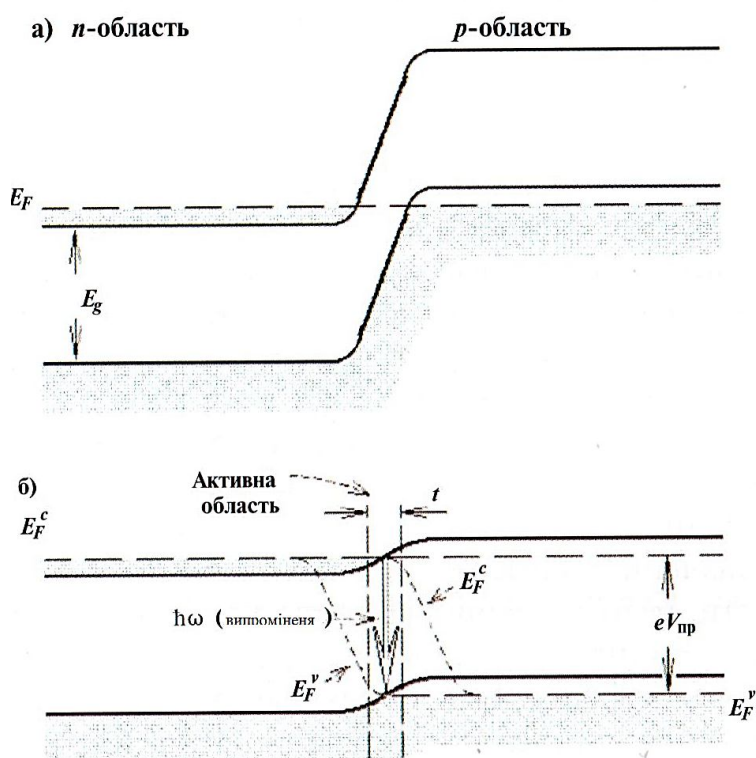


Рисунок 2.2 – Енергетична діаграма  $p$ - $n$ -переходу в напівпровіднику: а) – за відсутності електричної напруги («нульове зміщення»); б) – при прикладенні напруги в прямому напрямку («пряме зміщення»)

надлишковий заряд, який вноситься в кожную область інжектіваними через  $p$ - $n$ -перехід неосновними носіями.

Отже, прикладена зовнішня напруга сприяє проходженню через  $p$ - $n$ -перехід, струму інжекції  $I_{inj}$ . Саме він є струмом помпування, тобто джерелом енергії для світлодіода.

Якщо до напівпровідникового кристала з  $p$ - $n$ -переходом не прикладено ніякої зовнішньої напруги («нульове зміщення») і обидві його частини знаходяться в термодинамічній рівновазі один з одним, то значення енергії рівня Фермі (хімічного потенціалу) на всій довжині кристала однаковий. На рисунку 2.2, а цьому відповідає

один і той самий (умовний) верхній рівень заповнення станів електронів в  $p$ - і

рисуюнок 2.2, б ілюструє зміну взаємного розташування енергетичних зон і їх заповнення електронами при прямому зміщенні, коли до активного кристала прикладена зовнішня напруга  $V_f$ .

Величина цієї напруги вибирається відповідній енергетичній ширині забороненої зони кристала, тобто

$$V_f \approx \frac{E_g}{e}, \quad (2.5)$$

де  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – абсолютна величина заряду електрона.

Якщо прикласти зовнішню напругу, величина потенціального бар'єра зменшиться термодинамічна рівновага між  $p$ - і  $n$ -областями кристала порушується й положення рівнів (квазірівнів) Фермі в обох сторонах  $p$ - $n$ -переходу  $\epsilon$ , тепер неоднаковими. В  $n$ -області цей рівень (його енергія позначається як  $E_F^c$ ) розташований у зоні провідності, а в  $p$ -області (його енергія позначається як  $E_F^v$ ) – у валентній зоні.

У разі, коли виконується умова (2.5), в області потенційного бар'єра з'являється вузька подвійно вироджена область, яка містить електрони в зоні провідності й дірки у валентній зоні. Саме в цій області дуже велика вірогідність рекомбінації електронів і дірок із подальшим випроміненням кванта світла, тобто випромінювальної рекомбінації. Частота квантів, випромінених у цій області, задовольнятиме умові:

$$\nu \approx \frac{e \cdot V_f}{h}, \quad (2.6)$$

Довжина хвилі випромінення, зі свого боку, задовольнятиме умові:

$$\lambda \approx \frac{c \cdot n \cdot h}{e \cdot V_f}, \quad (2.7)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі;

$n$  – показник заломлення речовини активної області кристала.

Майже всі сучасні світлодіоди мають активну область у вигляді квантової ями (рис. 2.3). Квантові ями становлять вузькі області, розташовані між двома бар'єрними шарами, призначення яких полягає в затриманні вільних носіїв при ширині квантової ями менше 100 ангстрем.

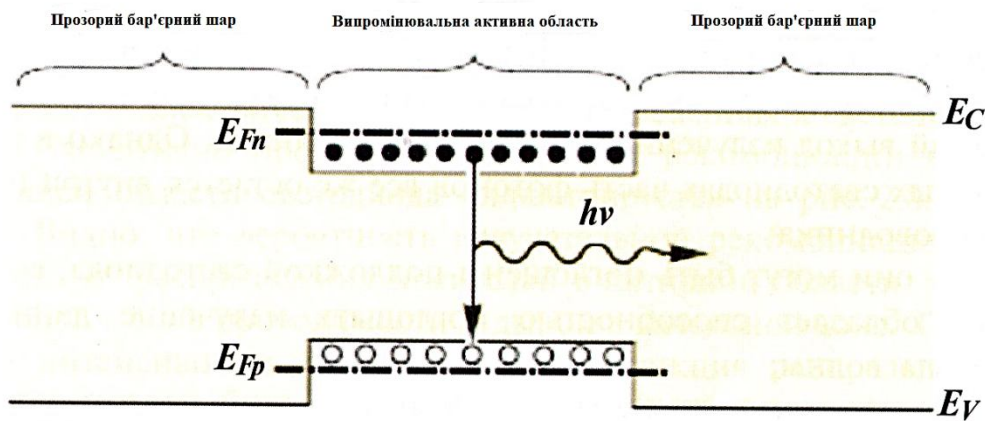


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення активної області світлодіода у вигляді квантової ями

Завдяки зменшенню ширини квантової ями можливо одержати високих значень концентрації носіїв і збільшення інтенсивності рекомбінації. У наслідок підсилення випромінювальної рекомбінації час життя носіїв скорочується, що призводить до зростання квантового виходу.

Внутрішній квантовий вихід випромінювання світлодіода (або його внутрішня ефективність) визначається відношенням числа народжених в активній області фотонів до кількості інжектованих до неї електронів в одиницю часу (секунду), тобто

$$\eta_{int} = \frac{P_{int}/(h \cdot \nu)}{I_{inj}/e} \quad (2.8)$$

де  $P_{int}$  – потужність оптичного випромінювання із активної частини світлодіода;  
 $I_{inj}$  – струм інжекції.

Внутрішній квантовий вихід ідеального світлодіода дорівнював би одиниці, але квантовий вихід реальних світлодіодів завжди менше одиниці. Внутрішній квантовий вихід визначається відношенням кількості фотонів, що випромінюють усередині напівпровідникового матеріалу, до кількості електронно-дірочних пар, які беруть участь в актах рекомбінації. Відзначимо, що через проблеми, пов'язані з поглинанням світла, далеко не всі випромінювані фотони залишають середовище напівпровідника. У реальних світлодіодах частина фотонів залишається всередині напівпровідника:

- вони можуть бути поглинуті підложкою світлодіода, якщо вона має здатність поглинати випромінювання певної довжини хвилі;
- вони можуть зіткнутись з металевою поверхнею контакту й також поглинутись нею, що призводить до пониження квантового виходу.

Крім того, існує явище повного внутрішнього відбиття, яке полягає в локалізації світла в середині структури. Тому вводиться поняття «коефіцієнт

оптичного виводу випромінення», що визначається як відношення кількості фотонів, випромінюваних світло діодом, до кількості фотонів, утворених в активній області в одиниці часу (секунду), тобто

$$\eta_{extraction} = \frac{P/h \cdot \nu}{P_{int}/h \cdot \nu} \quad (2.9)$$

де  $P$  – потужність оптичного випромінення, яке виходить за межі світлодіода.

Цей параметр свідчить про якість світлодіода. Без застосування складних і дорогих технологічних процесів практично неможливо зробити світлодіод з  $\eta_{extraction} \rightarrow 50\%$ .

Зовнішній квантовий вихід випромінення світлодіода визначається відношенням кількості фотонів, випромінених світлодіодом, до кількості інжекттованих електронів одиниці часу (секунда), тобто

$$\eta_{ext} = \frac{P/h \cdot \nu}{I/e} = \eta_{int} \cdot \eta_{extraction} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) світлодіода дорівнює:

$$\eta_{power} = \frac{P}{I \cdot V} \quad (2.11)$$

де  $I \cdot V$  – електрична потужність, підведена до світлодіода.

Схематично процес випромінювальної рекомбінації в активній області світлодіода подано на рисунку 2.4.

Бачимо, що ймовірність випромінювальної рекомбінації залежить від розподілу носіїв в активній області електронній зоні. Також на інтенсивність свічення впливає функція розподілу густини станів в активній області.

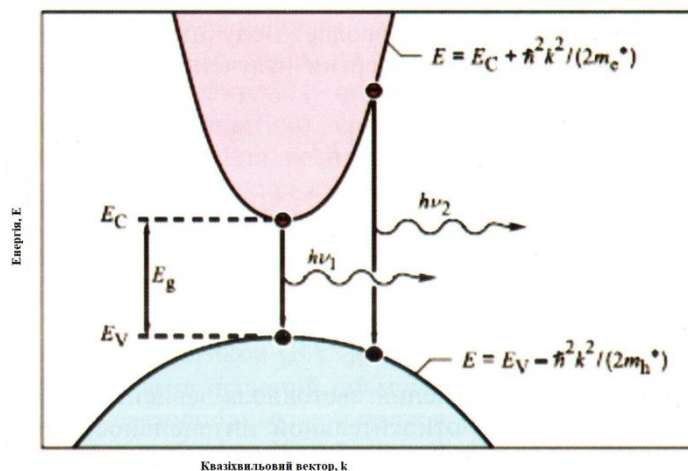


Рисунок 2.4 – Схема процесу випромінювальної рекомбінації в активній області світлодіода за допомогою конфігураційних кривих

$$I(E) \sim \sqrt{E - E_g} \cdot \exp(-E/kT) \quad (2.12)$$

Спектральна лінія випромінення світлодіода може бути апроксимована згортою функції розподілу носіїв і функції густини станів в активній області (рис. 2.5).

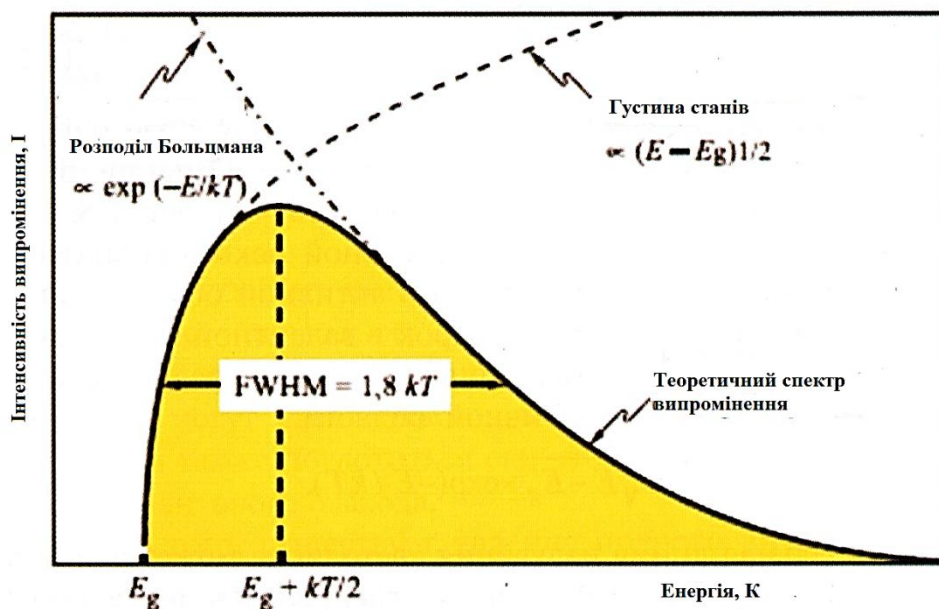


Рисунок 2.5 – Моделювання спектральної лінії випромінення світлодіода

Така апроксимація дає змогу одержати такі вирази для визначення енергії випромінення й напівширини лінії:

$$E = E_g + \frac{1}{2} kT, \quad (2.13)$$

$$\Delta E = 1,8 kT \quad (2.14)$$

При довжині хвилі вираз (2.14) виглядає так:

$$\Delta \lambda = \frac{1,8 kT \lambda^2}{h \cdot c} \quad (2.15)$$

Інтенсивність випромінення світлодіода залежить від прямого струму  $I_f$ . Залежність відносної інтенсивності випромінення від струму для світлодіодів на основі різних матеріалів представлена на рисунку 2.6.

Зазвичай характеристику інтенсивності використовують світловий потік, а криву називають люмен-амперною характеристикою (далі ЛАХ).



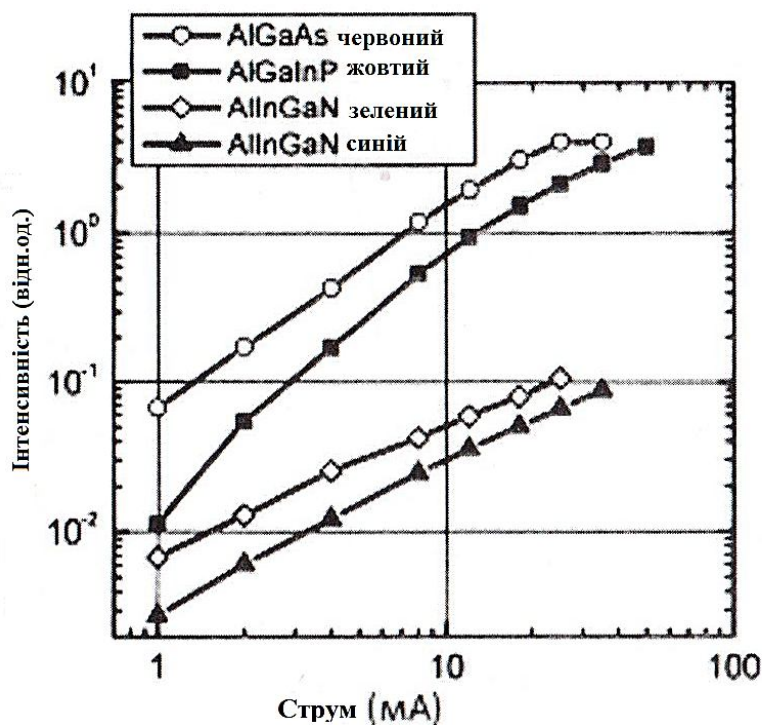


Рисунок 2.6 – Залежність відносної інтенсивності випромінювання від струму для діодів на основі різних матеріалів

Отже, зі збільшенням струму спостерігається зростання інтенсивності. При малих струмах ця залежність має практично лінійний характер, із підвищенням струму спостерігається насичення характеристики, пов'язане з нагріванням активної області кристала. Для різних матеріалів це насичення різне. Це залежить, насамперед, від теплових характеристик світлодіодного кристала, а також від теплових характеристик корпусу світлодіода [10].

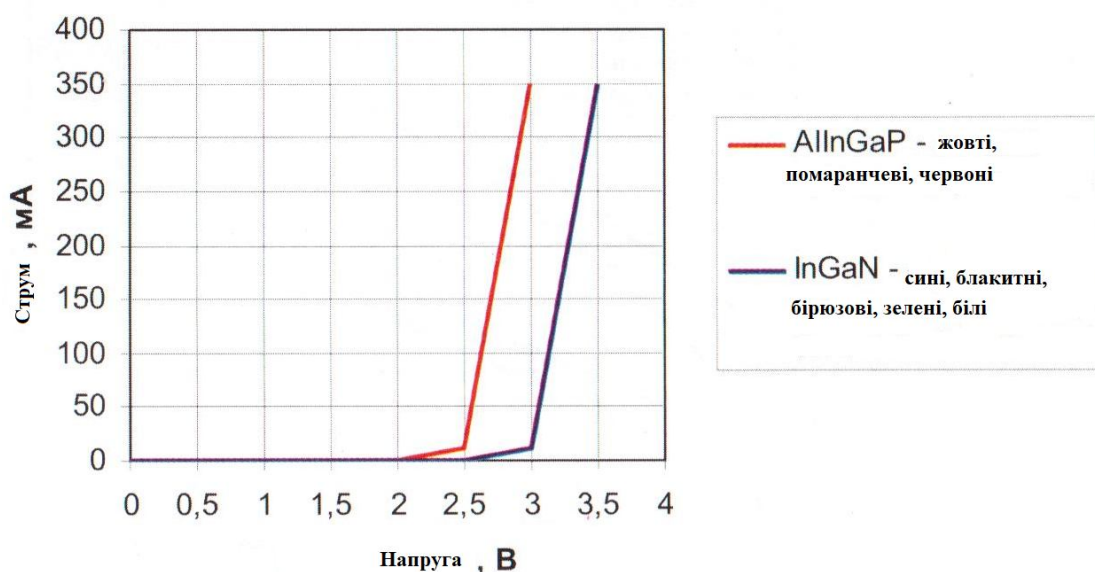


Рисунок 2.7 – Залежність струму від значень прямої напруги для різних матеріалів світлодіодних кристалів (прямої гілки ВАХ)

Протікаючий через світлодіод струм залежить від прикладеної напруги. Така залежність називається вольт-амперною характеристикою (далі – ВАХ).

На рисунку 2.7 наведені залежності струму від значень прямої напруги для різних матеріалів світлодіодних кристалів (прямі гілки ВАХ).

Пряма напруга  $V_f$  відповідно до формули (2.5) дорівнює значенню ширини забороненої зони, поділеному на заряд електрона. На рисунку 2.7 воно зображено як порогове значення. Тому матеріалам із різними значеннями забороненої зони відповідають різні значення робочої напруги. Для світлодіодних кристалів на основі твердого розчину InGaN – синіх, блакитних, бірюзових, зелених, білих – значення робочої напруги становить порядку 3,0 В і більше, для кристалів на основі AlInGaP – жовтих, червоних, помаранчевих – порядку 2,5 В і вище.

### 2.3 Класифікація світлодіодів

У корпусі світлодіода може міститися один кристал (однокристалльні світлодіоди) або декілька кристалів (багатокристалльні світлодіоди або матриці).

Сучасні світлодіоди можна умовно розподілити на декілька основних груп за вживаною потужністю та робочому діапазону струмів: індикаторні, надяскраві й потужні.

Індикаторні СД – компактні світлодіоди, мають порівняно невелику силу світла (до 100 мкд). Робочий діапазон струму близько 20 мА. Ці СД зазвичай випускаються в стандартному корпусі з виводами (діаметр основи 3 або 5 мм). Здебільшого такі світлодіоди застосовуються в оптичних індикаторах.

Надяскраві СД зазвичай складаються на напівпровідникових кристалах малого й середнього розміру (від 200 мм × 200 мм до 500 мм × 500 мм) і мають високі світлові характеристики (сила світла до 10 кд, середній світловий потік в білому кольорі порядку 20–30 лм і більше). Робочий діапазон струмів від 20 мА до 150–200 мА. Можуть бути виконані в стандартному корпусі з виводами (діаметр основи 3,5 мм або 10 мм) або в корпусі для поверхневого монтажу (smd-світлодіоди). Необхідно відзначити, що надяскраві СД займають проміжне становище між індикаторними і потужними СД, і чітку границю тут визначити досить складно. Надяскраві СД мають широкий спектр застосування – світлова реклама, дорожні світлофори та покажчики, автомобільна світлотехніка, екрани, мобільні телефони тощо.

Потужні СД мають найбільші розміри кристалів і найбільші значення світлової віддачі (більше 50 лм/Вт для білого кольору). Споживана потужність у номінальному режимі (струм 350 мА) становить 1 Вт. Дозволяється застосування при струмах 500, 700, 1 000 мА і вище. Підвищення робочого

струму дає змогу збільшити світловий потік. Випускаються в корпусі для поверхневого монтажу (smd-корпусі). Основним застосуванням потужних світлодіодів є різноманітні освітлювальні установки.

Окремо необхідно зупинитися на світлодіодних модулях. СД модулі становлять складання із багатьох кристалів, з'єднаних у послідовно-паралельні ланцюги на одній платі [12].

СД модулі випускаються у вигляді плат із контактами для паяння й отворами для закріплення. Вони можуть мати вбудовані драйвери живлення на платі. Основним їх застосуванням є також освітлювальне обладнання.

Останнім часом світлодіоди стали класифікувати й за застосуванням. Західні виробники ввели нове поняття – світлодіоди для освітлення (Lighting Class LED). Ці світлодіоди повинні задовольняти визначеним вимогам до характеристик – світловому потоку й колірній температурі. Зокрема, як декларується провідними виробниками світловий потік таких світлодіодів не повинен знижуватися більше ніж на 30 % від початкового значення за 50 000 годин роботи, а зміна колірної температури не повинна бути візуально помітною.

## 3 КОНСТРУКЦІЯ СВІТЛОДІОДІВ

### 3.1 Кристали

Одним із основних компонентів, які входять до складу світлодіода, є напівпровідниковий кристал. Для світлодіодів, що випромінюють світло в довгохвильовій частині спектру – червоній, помаранчевій і жовтій – на сьогодні переважно використовуються кристали на основі розчинів фосфідів алюмінію, індію та галію: AlInGaP. Для світлодіодів, довжини хвиль випромінення яких лежать у короткохвильовій частині спектра – зеленій, блакитній і синій – використовуються кристали на основі нітриду галію – GaN – і його твердих розчинів InGaN і AlGaN. Кристали на основі GaN і його твердих розчинів використовують також для одержання білих світлодіодів. До складу таких світлодіодів входять додатково люмінофор, у стандартному випадку – на основі алюмо-ітрієвого граната (YAG).

Існують дві технології вирощування кристалів на основі GaN і його твердих розчинів. Найрозповсюдженіша технологія, яка використовується більшістю виробників, полягає у вирощуванні структур нітридів на сапфіровій ( $Al_2O_3$ ) підкладці. Друга технологія передбачає використання для вирощування кристалів на основі GaN і його твердих розчинів підкладок із карбиду кремнію (SiC).

На початку 90-х років XX сторіччя японські дослідники створили перший світлодіод на основі GaN-структур з *p-n*-переходом, вирощених на підкладках із  $Al_2O_3$ . Структура світлодіода була вирощена на сапфіровій підкладці. Світлодіод випромінював світло в ультрафіолетовому й синьому діапазонах, його ККД становив порядку 1 %. Для того часу це була достатньо велика величина для GaN на сапфіровій підкладці, коли спостерігається велике неузгодження параметрів решітки.

Буквально через рік співробітники японської компанії Nichia Chemical розробили нову систему вирощування GaN-методом металоорганічної газофазної епітаксії та запропонували технологічний спосіб активації акцепторів магнію шляхом високотемпературного відновлення й одержали перші світлодіоди блакитного та зеленого світіння. Світлодіоди були виготовлені на основі гетероструктур GaN і його твердих розчинів InGaN і AlGaN блакитного й зеленого свічення. ККД світлодіодів досягав 10 %.

Дослідники фірми Nichia довели також, що кристали на основі GaN і його твердих розчинів підходять для одержання світлодіодів білого світіння. Був запропонований метод використання люмінофорів на основі YAG, що перетворюють довжину хвилі синього світіння кристалу в жовто-зелене

світіння. Унаслідок складання сигналів у вказаних діапазонах одержується білий колір світіння.

Перші структури, незважаючи на вказаний достатньо високий квантовий вихід, містили велику кількість домішок і дефектів, що знижувало їхню ефективність. У спектрі синіх світлодіодів при низьких значеннях прямого струму спостерігалась тунельна смуга під дією сильних електричних полів в активній області, зумовлених флуктуацією потенціалу й кулонівськими полями домішок. Аналогічні тунельні складники спостерігались і на вольт-амперних характеристиках. При зворотній напрузі, рівній приблизно  $3E_q$ , у структурах синіх світлодіодів спостерігався іонізаційний пробій і ударна іонізація, за якої також спостерігалось світіння.

У спектрах спостерігалась широка смуга в діапазоні енергії кванта 2,2–2,3 еВ, що відповідало «жовтій смузі» дефектів у GaN, пов'язаній із донорно-акцепторними парами і/або подвійними донорами.

Розвиток йшов доволі швидко. Поступово концентрація дефектів і дислокацій у структурах зменшувались, через що покращувалась їхня якість. На сьогодні багато компаній випускають світлодіодні кристали на основі гетероструктур GaN і його твердих розчинів, вирощених на підкладках  $Al_2O_3$  синього кольору світіння з ККД порядку 40–45 % (рис. 3.1).

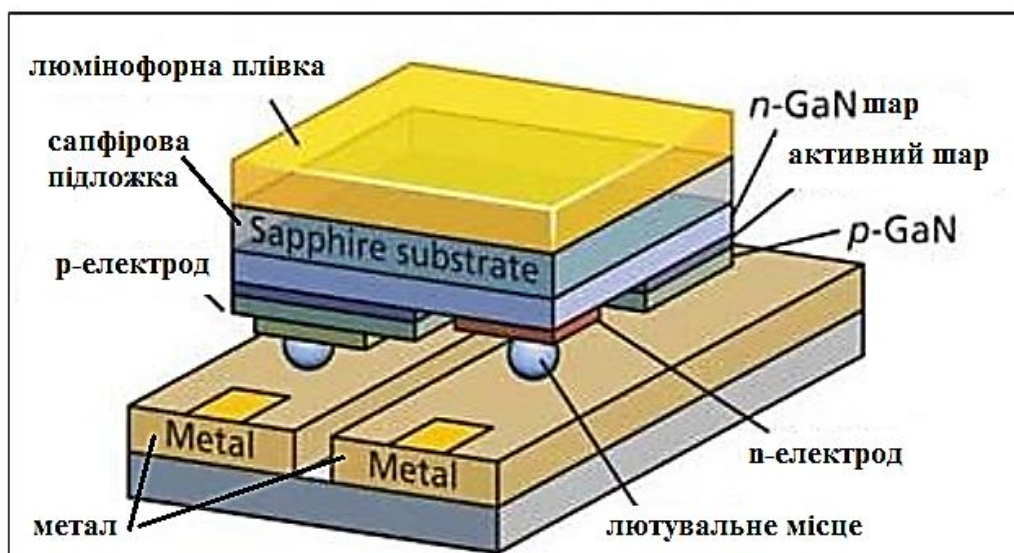


Рисунок 3.1 – Структура світлодіодів Flip chip (Carey, 2014) [13]

Окрім технології вирощування гетероструктур GaN і його твердих розчинів на підкладках  $Al_2O_3$ , існує альтернативна технологія вирощування структур на основі карбіду кремнію (SiC), розроблена компанією Cree. Технологія вирощування структур GaN на підкладках SiC має низку принципових відмінностей перед технологією GaN на сапфірі. Карбід кремнію має відмінну від  $Al_2O_3$  структуру кристалічної ґрати, що змінює процес

вирощування GaN- структур на таких підкладках. Відмінність кристалічної структури підкладки є причиною інших значень концентрації дефектів і дислокацій у структурі GaN і, як наслідок, інших значень квантового виходу випромінення. Оскільки неузгодженість кристалічної ґрати у карбіді кремнію та нітриду галію, які становлять приблизно 3,3 %, менше, ніж у сапфіра й нітриду галію, яке приблизно дорівнює 14,8% (рис. 3.2) кількість дислокацій у таких структурах зазвичай менше, а значення квантового виходу дещо більше.

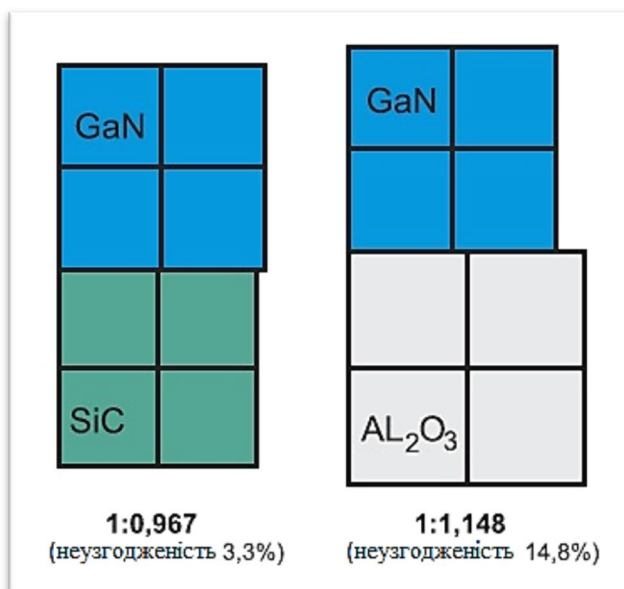


Рисунок 3.2 – Схема неузгодженості кристалічних решіток GaN-структур на підложках SiC і Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Крім того, SiC має на порядок більшу теплопровідність (350–490 Вт/мК у SiC проти 30–40 Вт/мК у Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), що поліпшує відвод тепла від активної області (*p-n*-перехода) і змінює теплові характеристики кристалу. По-друге, кристалічна ґрата SiC має кращу порівняно з сапфіром спорідненість із GaN, що принципово знижує концентрацію дефектів і дислокацій в структурі GaN (рис. 3.1) і підвищує квантовий вихід кристалу.

Крім того, карбід кремнію, як напівпровідник, дає змогу розробляти на своїй основі кристали з вертикальним протіканням струму, що призводить до зменшення опору структур і зниженню величини робочої напруги і, як наслідок, зниженню споживаної потужності.

Необхідно відзначити, що останніми роками низка компаній-виробників кристалів успішно опанували технологію відділення структури GaN від підкладки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і подальшого її монтажу на різноманітні тепло- й електропровідні матеріали (*lift-off* технології).

Ця технологія також дає змогу вирішити проблему дислокацій, пов'язаних із відмінністю сталої ґрати структури й підкладки, а також поліпшити теплові й електричні якості кристалів і підвищити квантовий вихід

випромінення. Нова сукупність кристалів має низку принципових технологічних відмінностей, які дають змогу підвищити ефективність виводу випромінення й світлову віддачу світлодіода. Необхідно відзначити, що поряд із вказаними перевагами карбід кремнію є достатньо дорогим матеріалом порівняно з сапфіром, тому технологія вирощування кристалів GaN на сапфірі дешевша, ніж на SiC.

### 3.1.1 Використання контактів різної геометричної форми

До верхніх контактів висуваються досить строгі вимоги. Зазвичай, верхній контакт у світлодіоді грає роль площадки для приварювання з'єднувального дроту. Ця площадка часто має круглу форму й діаметр 100 мкм. Водночас верхній контакт повинен забезпечувати омичний зв'язок з шаром розтікання струму та мати малий опір. На рисунку 3.3 продемонстровані приклади верхніх контактів різної форми.

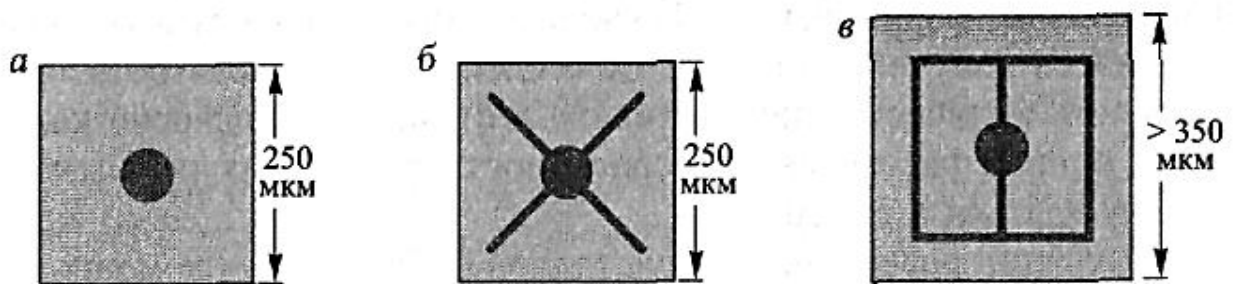


Рисунок 3.3 – Вид зверху кристалу світлодіода із верхнім контактом у формі:

- а – кола, що одночасно відіграє роль площадки для приварювання з'єднувального дроту;
- б – перехрестя з колом для з'єднувальної площадки;
- в – типова форма контакту для світлодіодних кристалів великої площі

Рисунок 3.3, а ілюструє найпростішу форму контакту. Контакт на рисунку 3.3, б забезпечує більш рівномірний розподіл струму над усією площею активної області. Зазначимо, що для запобігання поверхневої рекомбінації до країв кристала світлодіода повинен йти лише незначний струм.

Для світлодіодних кристалів великої площі форми контактів, що зображені на рисунках 3.3, а та 3.3, б не годяться, оскільки вони не можуть забезпечити рівномірний розподіл струму. Для таких світлодіодів можна використовувати контакти, які зображені на рисунку 3.3, в. Площу верхніх контактів прагнуть робити якомога меншою, щоб їхні непрозорі ділянки не заважали виходу випромінення з активної області. Але опір контактів безпосередньо пов'язаний із їхньою площею, тому площу верхнього контакту неможливо нескінченно зменшувати.



### 3.1.2 Технологія вирощування світлодіодів на прозорих підкладках

Світлодіоди видимого спектра  $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P$ , що працюють на довжинах хвиль у діапазоні 560–660 нм, зазвичай вирощують на підкладках GaAs. При цьому параметри решіток матеріалу світлодіода та підкладки узгоджені одне з одним. Оскільки при кімнатній температурі ширина забороненої зони GaAs  $E_g = 1,424$  еВ ( $\lambda = 870$  нм), товсті підкладки GaAs поглинають частину світла робочих довжин хвиль, що випромінюються в їхній бік. Тому світлодіоди AlInGaP/GaAs, що вирощені на підкладках GaAs, мають низькі коефіцієнти оптичного виводу світла. Коефіцієнт оптичного виводу в світлодіодах AlInGaP можна істотно підвищити вилученням підкладки GaAs та з'єднанням епітаксialного шару AlInGaP із підкладкою GaP (Kish et al., 1994). GaP – непрямозонний напівпровідник із шириною забороненої зони  $E_g = 2,24$  еВ ( $\lambda = 553$  нм). Тому він не поглинає світло з  $\lambda > 553$  нм, що випромінюється активною областю AlInGaP. На рисунку 3.4 схематично зображено технологію виготовлення світлодіода AlInGaP на підкладці GaP. Спочатку методом епітаксії металоорганічних сполучень із газової фази на підкладці GaAs вирощується подвійна гетероструктура AlInGaP. Після цього на верхній поверхні гетероструктури методом епітаксії з газової фази з використанням хлоридів вирощується товстий шар розтікання струму GaP (50 мкм). Така технологія вирощування – недорогий метод формування товстих епітаксialних шарів. Наступний етап полягає у хімічному вилученні підкладки GaAs методом селективного рідинного травлення (Adachi, Oe, 1983; Kish et al., 1994). Під час видалення підкладки GaAs товстий шар розтікання струму GaP відіграє роль механічної опори для тонкої подвійної гетероструктури. Після цього гетероструктура з шаром GaP скріплюється з підкладкою GaP.

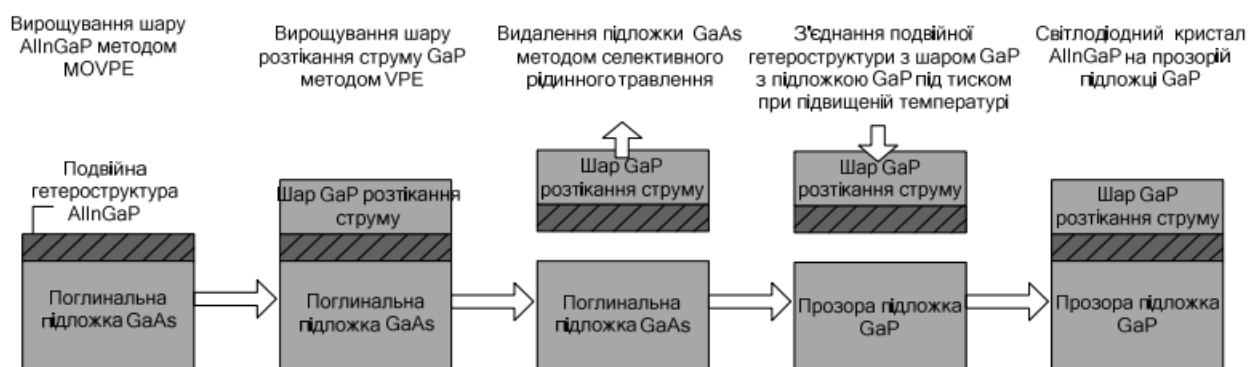


Рисунок 3.4 – Схема процесу виготовлення світлодіодного кристалу AlInGaP на прозорій підкладці GaP. Після видалення підкладки GaAs підвищується температура й подвійна гетероструктура з шаром GaP під тиском притискується до підкладки GaP, унаслідок чого формується єдина структура кристала світлодіода (Kish et al., 1994)



Процес з'єднання двох пластин потребує високого ступеня чистоти поверхонь, відсутності будь-яких частинок між пластинами та видалення з поверхонь окислів. Зазор між двома пластинами часто заповнюється спеціальним клеєм. При обертанні пластин із високою швидкістю цей клей видавлюється зовні. У роботах Кіша та ін. і Хефлера та ін. (Kish et al., 1995; Hoefler et al., 1996) описана технологія з'єднання пластин AlInGaP та GaP, що застосовується для підкладок GaP діаметром 50 мм (два дюйми). У цій технології використовується одновідний тиск при підвищених температурах (750–1 000 °C) (Hoefler et al., 1996). Доведено (Kish et al., 1995), що якість провідної області на межі розділу двох пластин сильно залежить від вирівнювання на кристалографічному рівні поєднуємих пластин, а не від узгодження їх кристалічних решіток. Відзначено, що при одночасному обертанні пластин кристалографічні орієнтації їхніх поверхонь повинні залишатись узгодженими. Описана технологія використовується у серійному виробництві світлодіодів AlInGaP/GaP, що працюють при низьких прямих напругах (приблизно 2,2 В). За надійністю такі світлодіоди порівняні з світлодіодами AlInGaP/GaAs. Зазвичай технології склеювання пластин патентовані та невідомі широкому колу.

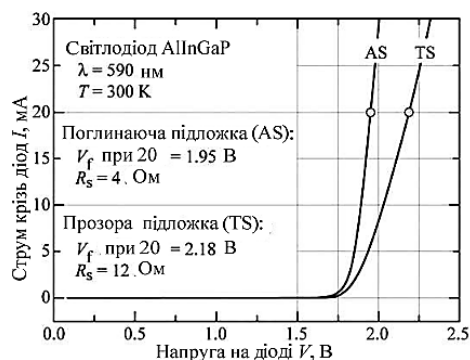


Рисунок 3.5 – Вольтамперні характеристики, значення прямої напруги й послідовного опору світлодіодів AlInGaP на підкладках GaP и GaAs

Пряма напруга є важливою характеристикою світлодіодів, що виготовлені за технологією поєднання пластин. Низькі значення напруги свідчать про відсутність проміжних оксидних шарів та формування повноцінного хімічного зв'язку між двома напівпровідниковими пластинами. На рисунку 3.5 проілюстровані вольтамперні характеристики двох світлодіодів AlInGaP, що випускаються промисловістю, – на поглинаючій випромінювання підкладці й на прозорій підкладці.

Бачимо, що світлодіод на прозорій підкладці має більш високі значення прямої напруги та послідовного опору порівняно зі світлодіодом на поглинаючій підкладці. Більш високу напругу у світлодіодів на прозорих

підкладках можна пояснити омичними втратами або на межі розділу між пластинами, або у підкладці GaP. Для мінімізації поглинання на вільних носіях концентрацію легуючих домішок *n*-типу та в підкладці GaP намагаються підтримувати помірно низькою. На рисунку 3.6 для порівняння наведено мікроснімки двох світлодіодів AlInGaP: на прозорій GaP та поглинальній GaAs підкладках.

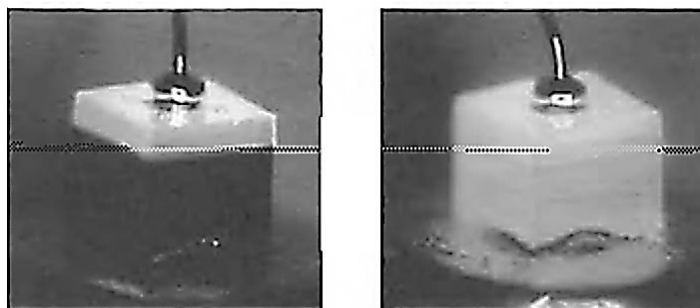


Рисунок 3.6 – AlInGaP-світлодіод жовтого світіння з GaP-шаром розтікання струму на поглинаючій GaAs-підкладці (а); AlInGaP-світлодіод жовтого світіння з GaP-шаром розтікання струму на прозорій GaP-підкладці (б).

У структурі світлодіода другого типу між підкладкою та активним шаром можна розгледіти клей на основі епоксидної смоли з додаванням срібла (Kish, Fletcher, 1997)

У світлодіодах другого типу підкладка виглядає темнішою, ніж у світлодіодах першого типу. Зовнішній квантовий вихід світлодіодів AlInGaP/GaP у 1,5–3,0 рази вище, ніж світлодіодів AlInGaP/GaAs.

### 3.2 Корпуси

Існує кілька типів корпусів світлодіодів. Насамперед необхідно розрізняти вивідні й поверхневого монтажу. Вивідні корпуса в основному використовуються для індикаторних і надяскравих СД, а корпуси SMD – для надяскравих і потужних СД. Корпус вивідного світлодіода складається із металевої рамки з відбивачем і контактами, і епоксидного ковпачка, який виконує функцію лінзи. Конструкція такого світлодіода проілюстрована на рисунку 3.7. Напівпровідниковий кристал світлодіода монтується в чашку відбивача металевої рамки, яка має відповідно позитивні й від’ємні контактні площадки. Контактні майданчики, розташовані на верхній грані кристала для забезпечення електричного контакту з ніжками рамки приварюються за допомогою з’єднувальних дротів до позитивного та від’ємного виводів рамки – аноду й катоду відповідно. Матеріалом вивідного дроту зазвичай є золотий дріт. Монтаж кристала може виконуватись за допомогою клею

(теплопровідного або струмопровідного) або паяльної пасти. Клей або паста забезпечує, насамперед, відвід тепла від кристала при виділенні в ньому електричної потужності внаслідок протікання через нього електричного струму. Також струмопровідний клей або паяльна паста можуть забезпечувати

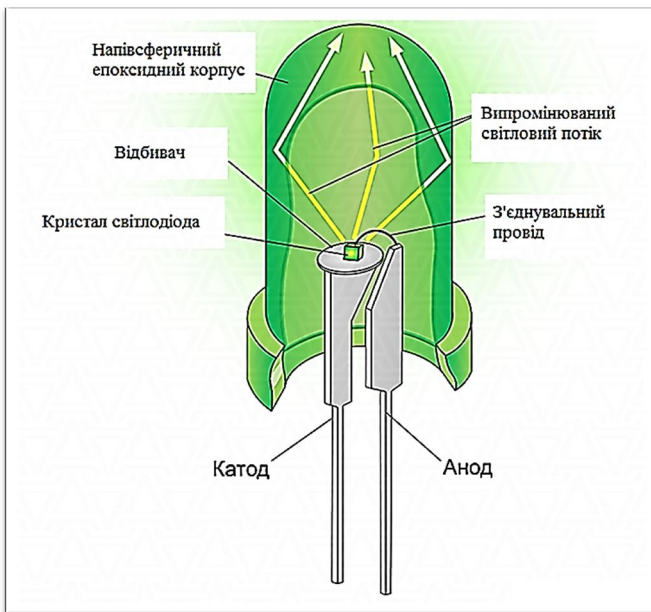


Рисунок 3.7 – Конструкція світлодіода в корпусі діаметром 5 мм

електричний контакт кристала з рамкою, якщо кристал має нижній провідний шар, і металізований контактний майданчик – нижній контакт. У цьому разі з'єднувальний дріт зварюється тільки до верхнього контактного майданчика кристала – верхньому контакту. Зібрана в описаний спосіб арматура покривається зверху епоксидною смолою з утворенням напівсферичного епоксидного корпусу, який є лінзою. Ця лінза та відбивач основи утворюють первинну оптичну систему світлодіода. Зазвичай це надяскраві

індикаторні світлодіоди. Останнім часом багато виробників випускає надяскраві світлодіоди в SMD-корпусах.

Світлодіоди в описаних корпусах випускаються з різними кутами кривих світлорозподілення: 15, 20, 25, 30 і 60°, а також 70° × 30°, і 100° × 40°. Конструкція SMD-корпуса потужного світлодіода продемонстрована на рисунку 3.8.

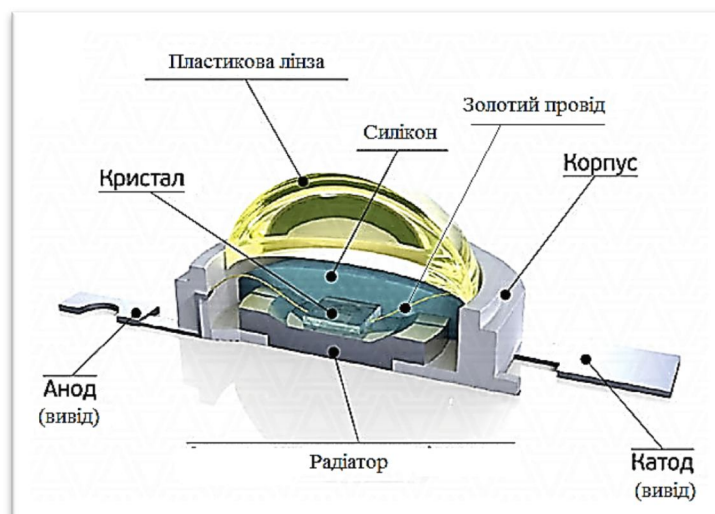


Рисунок 3.8 – Конструкція SMD-корпусу потужного світлодіода

Однією із основних частин SMD-корпусу світлодіода є тепловідводна основа – радіатор, на якому поміщається відбивач. У вказаному на рисунку корпусі цього типу дані елементи містяться в пластмасовому корпусі, також може використовуватись керамічний корпус (рис. 3.9).

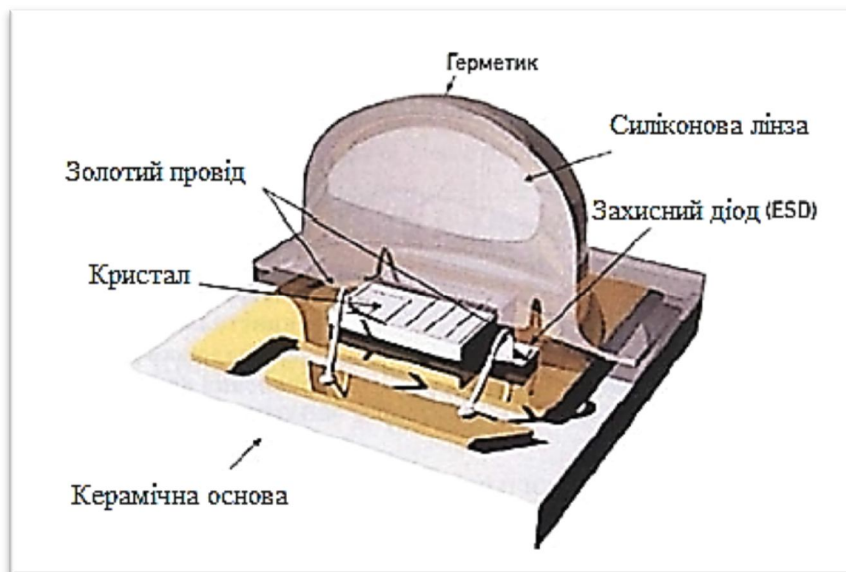


Рисунок 3.9 – SMD-корпус потужного світлодіода з керамічною основою

Напівпровідниковий кристал монтується у відбивач на теплопровідній основі, монтаж кристала також може проводитись за допомогою клею (теплопровідного або струмопровідного) або паяльної пасти. Багато виробників паралельно кристалу монтують захисний діод для підвищення надійності світлодіода. Деякі компанії використовують технологію перевернутого монтажу, за якого кристал монтується основою вверх, а контактами вниз (рис. 3.10).

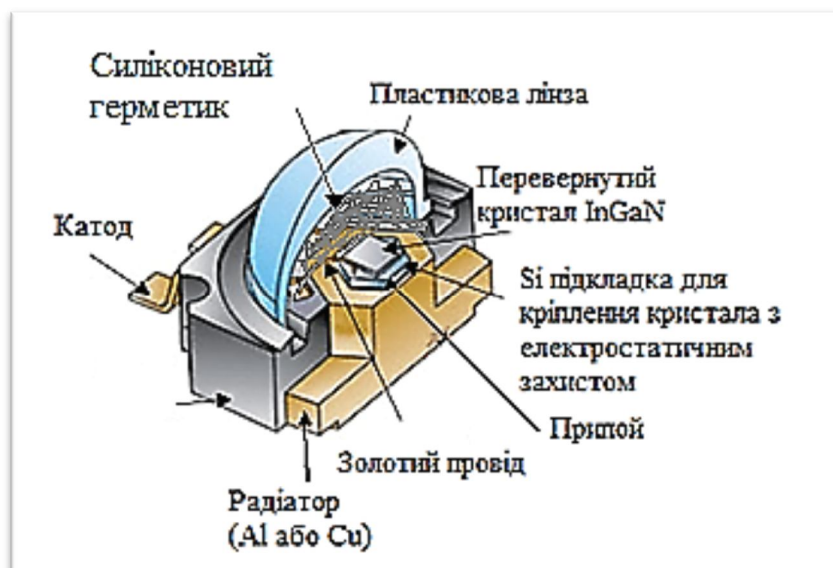


Рисунок 3.10 – Конструкція SMD-корпусу потужного світлодіода з перевернутим кристалом

Часто монтаж кристала виконується на кремнієвій підкладці, поміщеній на дно відбивача. За стандартного монтажу контактні майданчики, розташовані на верхній грані кристала, приварюються за допомогою золотого провідника до від'ємного та позитивного виводів – катоду й аноду відповідно (рис. 3.8, 3.9, 3.10).

Об'єм відбивача зі змонтованим у ньому кристалом заповнюють оптичним гелем на основі силікону (силіконовий герметик рис. 3.9, 3.10). З одного боку, цей гель збільшує коефіцієнт виведення випромінення із кристала, з іншого – дозволяє кристалу та провідним контактам не руйнуватися за теплового розширення під дією виділеного тепла внаслідок протікання електричного струму. Тепловивідна основа й заповнення гелем дає змогу кристалу в такому корпусі працювати за більш високої температури, ніж у корпусі діаметром 5 мм, і, як наслідок, подавати через кристал такого світлодіода більшу густину струму.

Зверху заповнений гелем відбивач закривається лінзою, яка у різних виробників може бути виготовлена із різних матеріалів – кварцового скла або силікону (рис. 3.9), або пластику (рис. 3.10). Лінза жорстко не фіксується (тому одержала назву «плаваюча лінза»), вона тримається за рахунок адгезії гелю та полімеризації, що також дає їй можливість теж зміщуватись при тепловому розширенні шляхом нагрівання світлодіода.

Оптична система світлодіодів у SMD-корпусі забезпечує достатньо широкі кути кривої світлорозподілення, зазвичай більше 90°. Для SMD-корпусів в останній час все ширше стали застосовувати матеріали на основі кераміки з підвищеною теплопровідністю.

### **3.3 Світлодіодні модулі або кластери**

Сучасні світлодіоди білого світіння в наш час досягли значних значень світлової віддачі (231 лм/Вт у лабораторних умовах і білі 110–130 лм/Вт у серійному виробництві). Технологія їх виробництва й матеріали продовжують удосконалюватись, що дає змогу одержувати все більше світла від одного світлодіода. Проте одиночний світлодіод (а точніше, світлодіодний чіп) дає порівняно мало світла для потреб освітлення, тому на практиці світлодіодні лампи та світильники становлять складання із двох або більше світлодіодів із повним набором електричних, оптичних, механічних і теплових компонентів. Такі складання називаються світлодіодними модулями (або кластерами).

Зазвичай, модулі випускаються у вигляді плат із контактами для паяння та отворами для кріплення; вони також можуть мати вбудовані пристрої керування і живлення на платі (рис. 3.11–3.12).



Рисунок 3.11 – Приклад світлодіодного модуля виробництва компанії Light Engines, LLC (а) і фірми OSRAM (б)



Рисунок 3.12 – Приклад модуля виконаного у форм-факторі одиничного світлодіода фірми OSRAM

Світлодіодні модулі можуть мати різні варіанти виконання. Головне, що їх об'єднує – електричне сполучення кількох світлодіодів або кристалів у послідовно-паралельні ланцюжки.

### **3.4 Сучасні основні технології виготовлення світлодіодів і світлодіодних модулів**

Необхідність підвищення потужності для збільшення світлового потоку призвела до того, що традиційна форма одночипового корпусного світлодіода перестала задовольняти виробників через погані умови відводу тепла. Треба було максимально наблизити кристал світлодіода до теплопровідної поверхні. У зв'язку з цим на зміну традиційній технології прийшли вдосконалена SMD-технологія (surface montage details – поверхневий монтаж деталей) і технологія COB (chip on board). Світлодіоди, виконані за SMD- і COB-технологіями, монтуються (приклеюються) безпосередньо на загальну підкладку, яка може

виконувати роль радіатора – у цьому разі вона робиться з металу або теплопровідної кераміки. Так створюються світлодіодні модулі, які можуть мати лінійну, прямокутну або колову форму, бути твердими або гнучкими залежно від вимог до конструкції освітлювальної системи.

Головна відмінна риса COB-технології порівняно з попередніми технологічними рішеннями полягає в удосконаленні й спрощенні процесу монтажу напівпровідникових кристалів. Світлодіоди в COB-модулях не ізолюються спеціальним захисним корпусом, а прямо прикріплюються на поверхню радіатора (зазвичай це сам корпус світлодіодного освітлювального пристрою).

Функцію відводу тепла в цьому разі виконує сам корпус, виготовлений із матеріалів, що мають високу теплопровідність. Світлодіодна продукція COB за тепловими параметрами на порядок перевищує всі існуючі світлодіодні аналоги (зазвичай це дискретна технологія), зроблені на основі попередніх технологічних рішень.

### **3.5 COB-технологія**

У COB-модулі безкорпусні кристали встановлені прямо на металеву основу, що дає змогу тепловий опір модуля  $< 1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$  на більших чипах і  $2\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$  на кристалах малих розмірів. Відповідно, у COB-модулях забезпечується менший тепловий опір між зоною рекомбінації кристала й зовнішнім середовищем, ніж у платі з корпусними світлодіодами, що очевидним чином забезпечує поліпшений тепловідвід від модуля порівняно із широко використовуваними раніше технологіями складання корпусованих світлодіодів на платах.

Зрозуміти економічний компонент інтегрального рішення COB-модулів можна на простому прикладі, порівнюючи джерела світла на платах із установленим на них корпусними дискретними світлодіодами й багатокристальними COB-модулями.

Якщо не розглядати об'єми виробництва та його оснащення, то на рівні світлодіодних модулів результат порівняння буде такий.

На рівні елементарних компонентів плата з корпусними світлодіодами становить саму плату, світлодіоди в корпусах, кожний кристал світлодіода з приєднаними контактами до корпусу та самі корпуси, встановлені на плату.

У багатокристальному COB-модулі відсутні корпуси у світлодіодів. Напівпровідникові кристали кріпляться безпосередньо на плату. У підсумку вартість COB-модуля потенційно може бути нижчою за вартість плати з корпусними світлодіодами.



### 3.6 SMD-технологія

В SMD-світлодіоді корпус має спеціальний майданчик для кріплення до теплопровідної поверхні, якою може бути існуюча друкована плата з якою-небудь теплопровідною основою без додаткового радіатора. Зручний і автоматизований монтаж SMD-світлодіодів, хороша теплопровідність корпусу й висока світловіддача дають змогу вибрати оптимальні й різноманітні рішення для створення систем освітлення. Існуючі SMD-світлодіоди розподіляються на малопотужні (до 0,1 Вт), середньої потужності (0,1–1 Вт) та потужні (понад 1 Вт).

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

На відміну від світлодіодних COB-модулів, для систем освітлення, що містять окремі світлодіоди, як у вигляді систем із великою площею, що світить, так і у вигляді точкових джерел світла, необхідно проводити монтаж світлодіодів на друковану плату лютуванням у конвекційній печі. На практиці рекомендується здійснювати монтаж світлодіодів за допомогою автомата-установника й проводити подальше паяння. Цей метод є досить складним і вимагає інвестицій у відповідне обладнання. Можливість об'єднання на одній такій друкованій платі безлічі світлодіодів, монтаж компонентів за допомогою стандартних автоматизованих технологій паяння, використання плати як радіатора охолодження – усе це в комплексі дає змогу створити компактні високоефективні освітлювальні прилади.

### 3.7 Переваги світлодіодних COB-модулів

У багатьох освітлювальних системах у цей час замість окремих світлодіодів використовуються COB-модулі, що містять набір світлодіодних кристалів. Багатокристалльні світлодіодні матриці легко монтуються. Крім того, їхня схема підключення досить проста. На сьогодні COB-модулі досягли значень енергетичної ефективності на рівні 160 лм/Вт і більше.

Найпростіші в застосуванні COB-модулі призначені для систем освітлення з розсіяним випроміненням. Зазвичай, їхній досить великий розмір дає змогу монтувати їх уручну. Паяння в конвекційній печі як домінуюча технологія створення з'єднань світлодіодів в SMD-корпусах не є обов'язковою. Матриці мають на поверхні полуджені контактні майданчики. Це дає змогу здійснювати монтаж уручну або за допомогою модулів кріплень. Відведення тепла відбувається через корпус.



COB-технологія має такі переваги:

- зниження собівартості світлодіодних приладів і підвищення ефективності їхньої роботи;
- дає змогу досягти високої яскравості світла навіть при невеликих розмірах світловипромінювальної площі;
- кількість виробничих операцій знижується вдвічі порівняно з технологією SMD, значно скорочуються терміни виробництва світлодіодних приладів;
- високий показник оптичної щільності випромінювача (на 1 площі підкладки можна встановити до 70 чипів);
- збільшений термін служби кристалів світлодіодів, надійність і ефективність тепловідводу;
- сумісність із різними електронними системами керування диммерування світла;
- рівномірний розподіл світлового потоку, відсутність ефекту тіней;
- компактність, невеликі розміри.

### **3.8 Об'ємні світлодіодні модулі**

Джерелами світла були обрані високоякісні й високоефективні SMD- і COB-світлодіоди виробництва CREE Inc. (США), а також високоефективні комерційні SMD-світлодіоди серії 5630 3G компанії LG Innotek Co Ltd (Корея). У випромінювачах СДМ застосовувалися серійні світлодіоди третього покоління, які мають підвищені світлові потоки та світлову ефективність не менше ніж 120–150 лм/Вт.

Утримувачі-тепловідводи світлодіодних випромінювачів виконувалися у вигляді єдиного формуючого об'ємного теплопровідного світла відбивального дзеркального елемента, основу якого механічно утримують три або більше відбивачів-радіаторів заданої форми, розташованих на заданій відстані один від одного й зігнутих під потрібним кутом до поздовжньої осі розсіювальної колби лампи. Сформовані на фронтальних поверхнях теплопровідних відбивачів-радіаторів дзеркальні покриття з загальним коефіцієнтом відбиття до 98 % забезпечують ефективне відведення тепла від світлодіодів за допомогою конструкції, а також збільшення світлової ефективності світлодіодного випромінювача у складі світлодіодної лампи.

Позитивний технічний результат досягається шляхом збільшення площі нових радіаторів для відводу конструктивного тепла від світлодіодів у 4–6 разів порівняно з СДМ плоского типу, а також шляхом збільшення світлової ефективності випромінювача у складі світлодіодної лампи завдяки додатковому

перевідбиванню високоефективними дзеркалізованими відбивачами-радіаторами в колбі розсіювача світла, а також за рахунок різноспрямованої орієнтації в просторі оптичних осей світлодіодів для поліпшення світлорозподілу та зниження блискавистості випромінювача.

Щоб сформувати на зворотних поверхнях теплопровідних відбивачів-радіаторів тепловипромінювальні покриття зі ступенем затемнення 0,8–0,9, теплопровідні відбивачі-радіатори розташовують на заданій відстані один від одного так, щоб їхні зворотні сторони розміщувалися не на діаметрально протилежних сторонах утримувача-тепловідводу, а навпроти проміжків між відбивачами-радіаторами, що забезпечить додатковий ефективний відведення тепла шляхом випромінювання від світлодіодних приладів.

Досягається цей результат завдяки тому, що запропоноване технічне рішення дозволяє застосувати для охолодження модуля радіаційну теплопередачу в навколишнє середовище за допомогою збільшеної його поверхні й коефіцієнта випромінювання поверхні утримувачів світлодіодів. При цьому ефективно здійснюється скидання тепла у зазори між відбивачами-радіаторами (за рахунок теплового випромінювання тильними сторонами відбивачів-радіаторів, на яких розташовані світлодіоди) на внутрішню поверхню розсіювальної колби лампи (ефект від покриттів із коефіцієнтом чорноти 0,8–0,9 може досягати 15–20 %).

Розташування напівпровідникових світловипромінюючих приладів малої потужності рівномірно в тепловому контакті на фронтальній дзеркальній стороні кожного відбивача – радіатора та з'єднання їх в електричну схему за допомогою гнучкої комутаційної плати з загальним коефіцієнтом відбиття її поверхні не менше 80 % забезпечує можливість додаткового збільшення світлового потоку лампи й зниження блискавистості випромінювача.

Забезпечується цей технічний результат завдяки тому, що запропоноване технічне рішення дає змогу використовувати менш потужні світлодіоди за рахунок збільшення їхньої кількості в об'ємних модулях і шляхом перевідбивання платою світлодіодного випромінювача відбитого світла від внутрішньої поверхні розсіювальної колби лампи.

Були розроблені кілька варіантів конструкцій експериментальних об'ємних світлодіодних модулів потужністю 15 Вт із використанням високоефективним міні COB і COB-світлодіодів, а також з потужністю 10 Вт з використанням високоефективних SMD-світлодіодів на основі гнучко-жорстких комутаційних плат на об'ємних утримувачах-тепловідводах.

Суть запропонованих технічних рішень більш докладно пояснюється конкретними прикладами. На наведених фотографіях продемонстрована послідовність виготовлення різних типів СДМ потужністю 10 Вт і 15 Вт на

SMD, міні COB у COB-світлодіодах, зовнішній вигляд модулів, їхній склад і структура.

На рисунку 3.13 наведено послідовність операцій складання експериментального зразка об'ємного СДМ потужністю 10 Вт на SMD- світлодіодах потужністю до 0,5 Вт. На рисунку 3.14 представлено послідовність операцій складання експериментального зразка об'ємного СДМ потужністю 15 Вт на MCOB світлодіодах потужністю до 1.5 Вт. На рисунку 3.15 подано послідовність формування об'ємного світлодіодного модуля з плоского СДМ на гнучко-жорсткій дзеркальній платі.

Одним із недоліків матеріалу дзеркалізованих утримувачів з анодованого алюмінієвого сплаву є відсутність можливості застосування його для виробництва відбивачів зі складними формами, що обумовлено властивими цьому матеріалу ушкодженнями верхнього захисного шару при витягуванні й згинанні. Цей багат шаровий матеріал складається з підкладки, що надає більшу жорсткість матеріалу, і ряду тонких (мікронної товщини) шарів, які надають матеріалу високу відбивну здатність. Крім того, цим матеріалам властива низька пластичність (зазвичай, допустиме відносне подовження в межах 2 %) і обмежена можливість у частині допустимої деформації багат шарового відбивального шару без його пошкодження. Матеріал MIRO-SUN або MIRO SILVER мають із боку дзеркального покриття захист поверхні тонким шаром  $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$  і лаковою зовні плівкою. При згинанні плоскої пластини з дзеркалізованою стороною зовні допускається мінімальний внутрішній діаметр кривизни до 2 мм. При згинанні плоскої пластини з дзеркалізованою стороною всередині допускається мінімальний внутрішній діаметр кривизни до 14 мм. При меншому діаметрі кривизни (6 мм) спостерігається пошкодження захисних покриттів.

Застосування нових підходів у технічних рішеннях дало змогу виключити зазначені вище труднощі. На лініях згинів виконувалися технологічні отвори, що полегшують формування ребер на початкових ділянках, і розвантажувальні пази в місцях крутих вигинів. На рисунку 3.16 представлено експериментальний зразок об'ємного дзеркалізованого світлодіодного модуля СДМ-10 потужністю 10 Вт. Світлодіодний модуль виконаний із матеріалу MIRO-SILVER 4270AG із загальним коефіцієнтом відбиття до 98 % і завтовшки 1,0 мм. Як джерело світла в СДМ були використані комерційні світлодіоди типу LEMW S59R80HZ2B00 компанії LG Innotek Co LTD (Корея) у пластмасовому SMD-корпусі типорозміру 5630 потужністю до 0,5 Вт, світловим потоком до 72 лм ( $T_j = 25^\circ\text{C}$ ) і світловою ефективністю до 160 лм/Вт при  $T = 5\ 000\ \text{K}$ . Індекс передачі кольору перевищує 80.

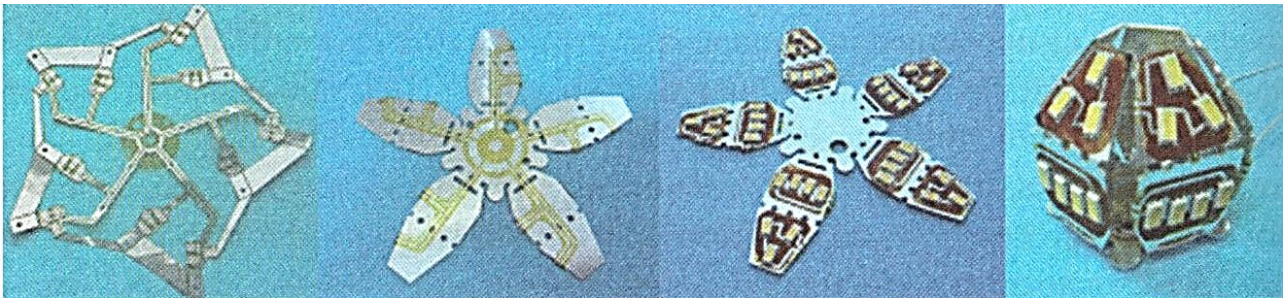


Рисунок 3.13 – Зразок дзеркалізованого об'ємного світлодіодного модуля потужністю 10 Вт, його склад, компоновання та послідовність складання: гнучка плата(а), гнучко-жорстка плата(б), гнучко-жорстка плата з світлодіодами (в), об'ємний світлодіодний модуль(г)

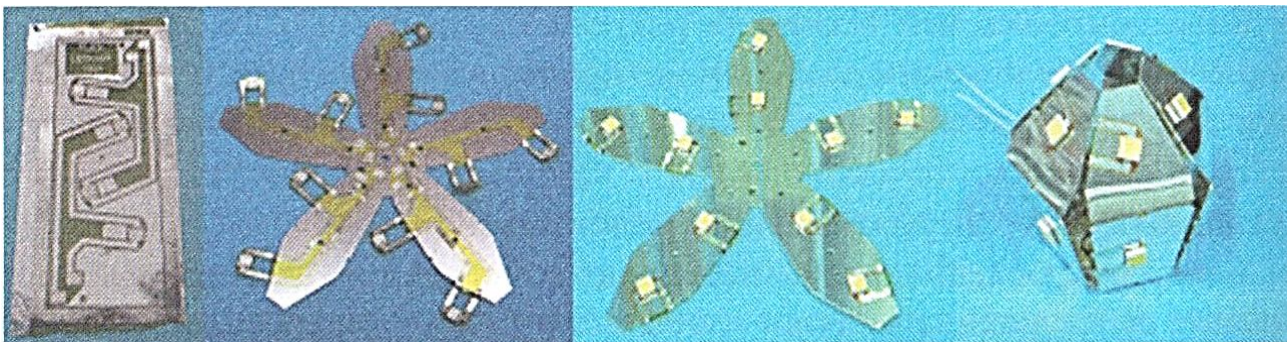


Рисунок 3.14 – Зразок дзеркалізованого об'ємного світлодіодного модуля потужністю 15 Вт, його склад, компоновання та послідовність складання: гнучка плата(а), гнучко-жорстка плата(б), гнучко-жорстка плата з світлодіодами (в), об'ємний світлодіодний модуль(г)

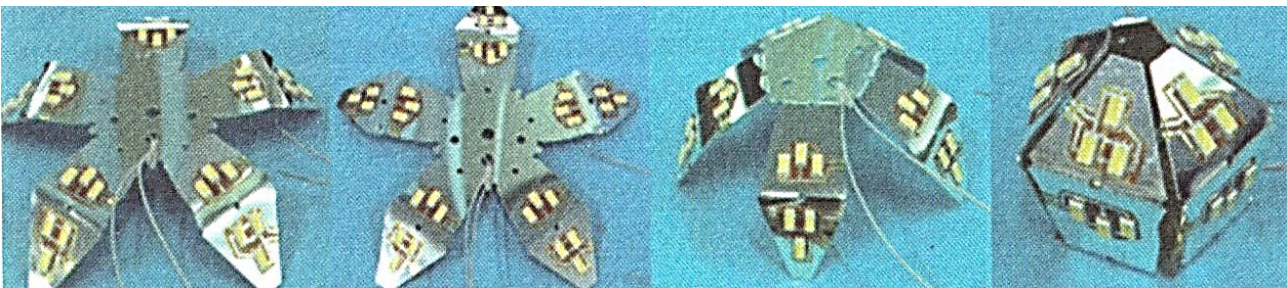


Рисунок 3.15 – Послідовність формування об'ємного світлодіодного модуля з плоского СДМ на гнучко-жорсткій дзеркальній платі



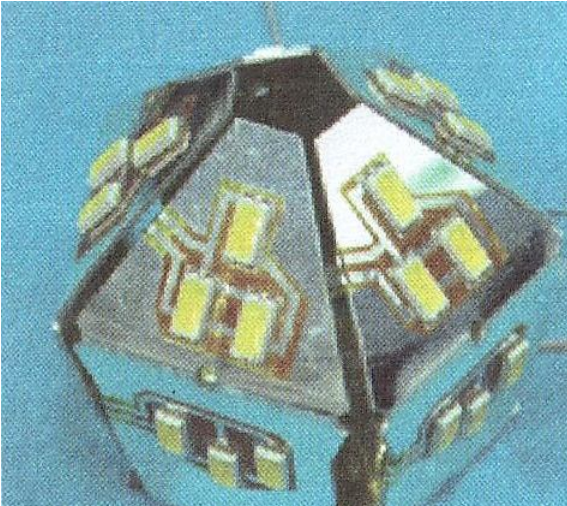


Рисунок 3.16 –  
Експериментальний зразок  
об'ємного дзеркалізованого  
світлодіодного модуля  
потужністю 10 Вт на SMD-  
світлодіодах компанії LG



Рисунок 3.17 –  
Експериментальний зразок  
об'ємного дзеркалізованого  
світлодіодного модуля  
потужністю  
10 Вт на SMD-світлодіодах  
компанії CREE



Рисунок 3.18 – Експериментальний  
зразок об'ємного дзеркалізованого  
світлодіодного модуля потужністю  
15 Вт на міні COB-світлодіодах  
(10 шт.) компанії CREE

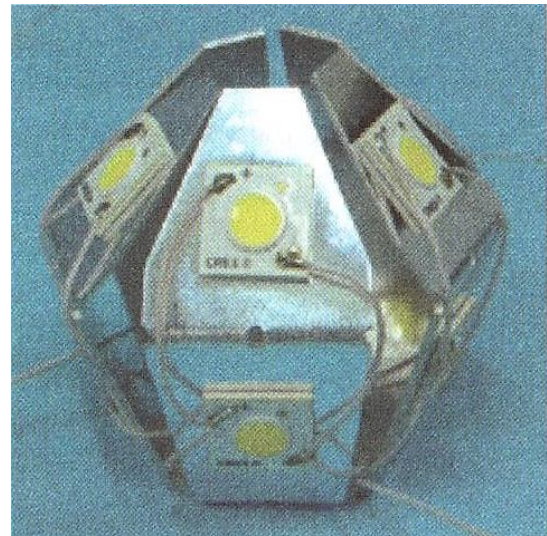


Рисунок 3.19 – Експериментальний  
зразок об'ємного дзеркалізованого  
світлодіодного модуля потужністю  
15 Вт на COB-світлодіодах (10 шт.)  
компанії CREE

На рисунку 3.13 проілюстровано експериментальний зразок об'ємного дзеркалізованого світлодіодного модуля СДМ-10 потужністю 10 Вт. Світлодіодний модуль виконаний із матеріалу MIRO-SILVER 4270AG із



загальним коефіцієнтом відбиття до 98% і товщиною 1,0 мм. Як джерело світла в СДМ були використані високоефективні SMD-світлодіоди типу XTEAWT-00-0000-00000 BJE3 компанії CREE Inc. (США) в корпусі типорозміру 3,45 мм × 3,45 мм потужністю до 0,5 Вт, світловим потоком до 80 лм ( $T_j = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ) і світловою ефективністю до 170 лм/Вт при  $T = 5000 \text{ К}$ . Індекс передачі кольору понад 70. На рисунку 3.14 зображено експериментальний зразок об'ємного дзеркального світлодіодного модуля СДМ-15 потужністю 15 Вт. Світлодіодний модуль виконаний із матеріалу MIRO-SILVER 4270AG із загальним коефіцієнтом відбиття до 98 % і товщиною 1,0 мм. Як джерело світла в СДМ були використані високоефективні міні COB-світлодіоди типу MNBAWT-0000-000C0BD450E компанії CREE Inc. (США) в корпусі типорозміром 5 мм × 5 мм потужністю до 1,5 Вт, світловим потоком до 510 лм ( $T_j = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ) і світловою ефективністю до 140 лм/Вт при  $T = 5\ 000 \text{ К}$ . Індекс передачі кольору понад 70.

На рисунку 3.19 наведено експериментальний зразок об'ємного дзеркалізованого світлодіодного модуля СДМ-15 потужністю 15 Вт. Світлодіодний модуль виконано з матеріалу MIRO-SILVER 4270AG із загальним коефіцієнтом відбиття до 98 % і завтовшки 1,0 мм. Як джерела світла в СДМ були використані високоефективні COB – світлодіоди типу CXA1304-0000-000N00D20E3, компанії CREE Inc. (США) в корпусі типорозміру 13,35 мм × 13,35 мм потужністю до 1,5 Вт, світловим потоком до 600 лм ( $T_j = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ) і світловою ефективністю до 150 лм/Вт при  $T = 5\ 000 \text{ К}$ . Індекс передачі кольору понад 70.

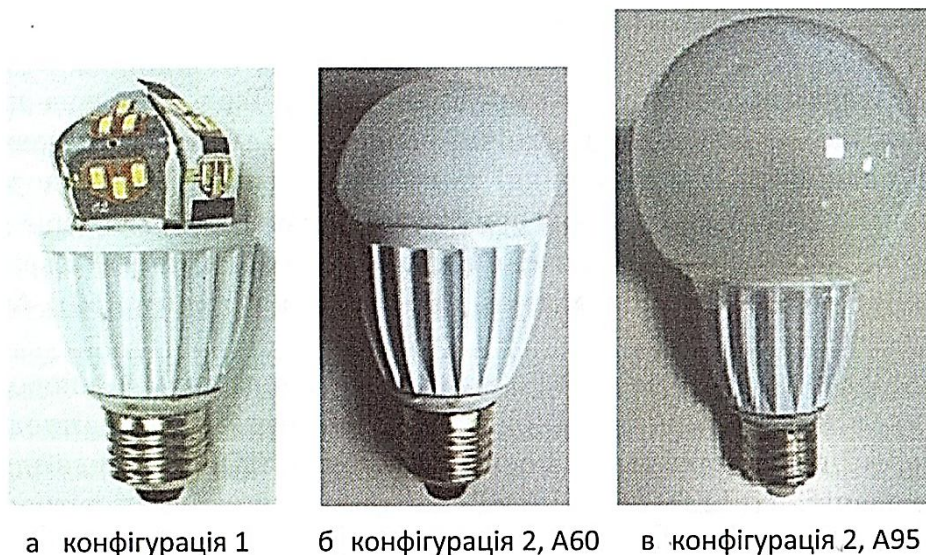


Рисунок 3.20 – Експериментальний зразок світлодіодного об'ємного модуля для лампи потужністю 10 Вт: а – конфігурація 1, б – конфігурація 2, А60, світлорозсіювач діаметром 60 мм, в – конфігурація 2, А95, світлорозсіювач діаметром 95 мм

У таблиці 3.1 подані електричні та оптичні характеристики експериментальних зразків об'ємних світлодіодних модулів потужністю 10 Вт і 15 Вт у конструкціях світлодіодних ламп із розміром А60 і А95 відповідно для конфігурації 1 і конфігурації 2 з розсіювачем світла (рис. 3.16).

Таблиця 3.1 – Електричні та світлові характеристики об'ємних СДМ потужністю 10 Вт і 15 Вт в лампах конфігурації 1 і 2 після 60 хвилин безперервної роботи

№ з/п	Тип СДМ	Тип конфігурації	I, А	U, V	P, W	Світловий потік, лм	Світлова ефективність, лм/Вт	ССТ,К	Ra
1	СДМ-10Вт SMD LG, Зразок № 2	Конфіг.1	0,33	30,1	9,93	1035	105	5933	87
		Конфіг.2, А60	0,33	29,9	9,87	783	79	5213	86
		Конфіг.2, А95	0,33	30,0	9,9	956	97	5381	87
2	СДМ-10Вт SMD CREE, Зразок № 4	Конфіг.1	0,36	27,6	9,94	1614	162	4575	72
		Конфіг.2, А60	0,36	27,5	9,0	1193	121	4446	71
		Конфіг.2, А95	0,36	27,5	9,0	1509	152	4563	71
3	СДМ-15Вт MCOB CREE, Зразок № 11	Конфіг.1	0,85	17,0	14,45	2022	140	4816	74
		Конфіг.2, А95	0,85	17,0	14,42	1834	127	4759	74
4	СДМ-15Вт COB CREE, Зразок № 14	Конфіг.1	0,44	34,0	14,94	2316	155	4539	72
		Конфіг.2, А95	0,44	33,8	14,87	2099	141	4536	72

З результатів випробувань, поданих у таблиці 3.1, можна зробити висновок, що запропоновані технічні рішення об'ємних СДМ дали змогу істотно поліпшити їхні електричні та світлові характеристики порівняно з плоскими СДМ. А інноваційна конструкція відбивачів-радіаторів СДМ зі свого боку забезпечила поліпшення електричних і оптичних характеристик побутових світлодіодних ламп із розміром колб типу А60 і А95 при підвищених потужностях.

### 3.9 Обмеження застосування світлодіодних COB-модулів

Два фактори обмежують застосування світлодіодних матриць, призначених для освітлення великих поверхонь: розподіл світла й ефективність системи. У разі, якщо необхідно реалізувати вузькоспрямований пучок світла, то застосування світлодіодних матриць із розсіяним випроміненням є недоцільним. Вартість COB-модулів нині досить висока, але в процесі одержання компаніями-виробниками достатнього досвіду в сфері технологій, а

також унаслідок збільшення об'єму виробництва, їхня вартість буде постійно знижуватись.

Здебільшого COB-модулі використовуються в сфері освітлення через високу щільність потоку випромінювання з одиниці поверхні й хорошої змішаності кольорів. Сьогодні ринок цих світлодіодів складається з чотирьох основних сегментів: освітлення, підсвічування, автомобільна промисловість та інші сфери застосування, які містять у собі медичне обладнання й проектори.

Зараз на ринок вийшли нові типи серійних COB-модулів, призначені для застосування у світлодіодних лампах-ретрофітах. Вони мають підвищені світлові потоки й низчі ціни. Це також дало змогу знизити вартість одного люмена світлового випромінювання на етапі вибору ефективних світлодіодів для комплектування світлодіодних випромінювачів. Так, наприклад, комплектування випромінювача світлодіодної лампи COB-модулями серії PLCC1208HL компанії EDISON OPTO (Тайвань) типу 2T0705NW11000003 потужністю до 5 Вт, зі світловим потоком до 600 лм і вартістю 0,52 дол. США за одну штуку на ринку України дає змогу забезпечити стартову вартість люмена COB-модуля для світлодіодного випромінювача орієнтовно на рівні 0,000 8 дол. США за один люмен.

Отже, можна з упевненістю констатувати, що технологія багатокристалльних COB стала важливим етапом на шляху еволюційного розвитку світлодіодних джерел світла й може конкурувати з SMD-технологією в сфері побутового освітлення. Ця технологія забезпечує не тільки високі показники світловіддачі для світлодіодів (нині до 160 лм/Вт), але дозволяє створювати потужні й, водночас, мініатюрні джерела освітлення різних конфігурацій і з надійною системою тепловідводу. Як впливає з проведеної спрощеної вартості оцінки люмена COB-модулів, світлотехнічні вироби на основі світлодіодних COB-модулів потенційно можуть мати меншу вартість одиниці світлового потоку порівняно з іншими LED-пристроями такого рівня яскравості й відрізнятися більшим терміном служби й надійністю завдяки удосконаленій системі відводу тепла. Це може сприяти їхньому активному застосуванню в складі ламп-ретрофітів більших потужностей (від 10–15 Вт і вище).

### **3.10 Аналіз вартісних показників, основних параметрів матеріалів і типових плат для світлодіодних модулів**

Дослідження різних існуючих конструктивно-технологічних рішень світлодіодних матриць і модулів дозволило зробити висновок, що на сьогодні перспективним сучасним напрямом технологічного розвитку світлодіодної



індустрії є створення нового покоління комерційного привабливих інтегрованих конструкцій плоских світлодіодних модулів на основі COB-модулів і SMD-світлодіодів третього покоління. Зокрема на гнучко-твердих і гнучких платах, на високотеплопровідних металевих друкованих платах типу MC PCB, ALOX, на мідних посріблених вивідних рамках (LEAD FRAME) і керамічних підставках з попередньо нанесеними струмоведучими трасами [5].

Друковані плати з металевою основою Metal Core PCB порівняно зі звичайними платами зі склотекстоліту мають такі переваги:

- розсіюють тепло без використання додаткових радіаторів і спеціальних теплопровідних паст;
- додають механічну твердість усьому виробу;
- дозволяють значно простіше організувати відвід тепла від компонентів, що нагріваються, за рахунок своїх властивостей охолодження;
- мають відмінні характеристики щодо електромагнітної сумісності й екрануванню.

Таблиця 3.2 – Основні параметри плат для плоских світлодіодних модулів

Комуруюча плата	Теплопровідність, Вт/(м·К)	КЛТР, $10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Примітка
Printed Circuit Board	0,36	13–17	Можливе виготовлення плат великого розміру
Metal Core PCB	1–2,2	17–23	Можливе виготовлення плат великого розміру; температура операцій до 140 °С
Плата на керамічній підкладці ALOX (нанопористий $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	10–16	4–6	Можливе виготовлення плат великого розміру; температура операцій до 300 °С
Кераміка $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}$	24–170	4,9–8	Підкладки малого розміру; дуже високі температури операцій; легко витримує високу потужність
Direct Bonded Copper, DBC – корпус	24–170	5,3–7,5	Високі температури операцій (до 800 °С); легко витримує високі потужність та струм
Мідна посріблена вивідна рамка ( <i>lead frame</i> )	170	8	Відмінність у КТР між AlN і Cu: 4,9 проти 8

Ефективним варіантом тепловідводу є також керамічні основи з попередньо нанесеними струмоведучими трасами, безпосередньо до яких приєднуються кристали світлодіодів. Однак керамічні підкладки мають підвищену крихкість.

Керамічні підкладки з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і AlN виготовляють із низькотемпературної та високотемпературної керамік. Позитивні аспекти використання керамічних підкладок зводяться до такого:

- керамічні підкладки є ізоляторами;
- наявність високої теплопровідності, особливо в AlN;
- за коефіцієнтом термічного розширення вони близькі до кремнієвих і сапфірових підкладок;
- вони підходять для застосування високопотужних світлодіодів і використовуються при високих температурах.

Серед недоліків керамічних підкладок можна зазначити таке:

- форму корпусу необхідно вибрати відповідно до процесу виготовлення кераміки, і при цьому виникає необхідність у додатковій оптиці;
- вартість виготовлення керамічних підкладок порівняно висока;
- підкладка з AlN в три рази дорожча за підкладку з Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Одним із варіантів корпусу світлодіода є керамічний DBC-корпус, що становить основу з кераміки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> або AlN, на якому методом прямого дифузійного зрощування закріплені тонкі шари міді. В англійській літературі ці корпуси називаються **direct bonded copper board**, скорочено – DBC. Часто нижня поверхня корпусу повністю покрита міддю, тоді як на верхній поверхні з міді зроблене електричне розведення, що забезпечує електричне з'єднання силових ключів, силових і керувальних виводів. DBC-керамічний світлодіод припаюється на металевий радіатор, який у процесі роботи слугує тепловодом для напівпровідникових елементів.

Проведений аналіз застосовуваних матеріалів і компонентів у світлодіодних модулях із платах з металевими основами (MC PCB) довів, що найпоширенішими типами плат, які можуть значно поліпшити теплові параметри світлодіодів у процесі їхньої експлуатації, є основи з міді або алюмінію. Алюміній (алюмінієві сплави) і мідь мають близькі значення механічної міцності ( $\sigma_{pAl} = (10-40) \text{ кгс/мм}^2$ ;  $\sigma_{pCu} = (16-45) \text{ кгс/мм}^2$ ). Однак алюміній має меншу теплопровідність, ніж у міді ( $\lambda_{TAl} = 180-230 \text{ Вт/мК}$ ;  $\lambda_{TCu} = 360-385 \text{ Вт/мК}$ ) і більший приблизно в 1,6 рази питомий електричний опір ( $\rho_{Al} = 0,028 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ;  $\rho_{Cu} = 0,017 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ). Суттєвим є те, що алюміній майже в 3,5 рази легше міді ( $\gamma_{Al} = 2,7 \text{ г/см}^3$ ,  $\gamma_{Cu} = 8,92 \text{ г/см}^3$ ) і в 2,5 рази дешевший.

На рисунку 3.21 зображена структура типової підкладки з алюмінію, фольгованого міддю. Сьогодні багатьма компаніями у світі проводяться роботи з підвищення характеристик теплопровідних діелектриків і фольгованих металевих підкладок на їхній основі. Такі виробники, як Ruikai, Totking (Китай) і Bergquist (США) та інші на основі теплопровідних адгезивів із полімерів із домішками дрібнодисперсних порошоків теплопровідних керамік випускають фольговані металеві підкладки з коефіцієнтами теплопровідності до 5 Вт/(м·К). Однак подібні фольговані металеві підкладки мають високу вартість, яка може досягти 150–200 дол./м<sup>2</sup>.

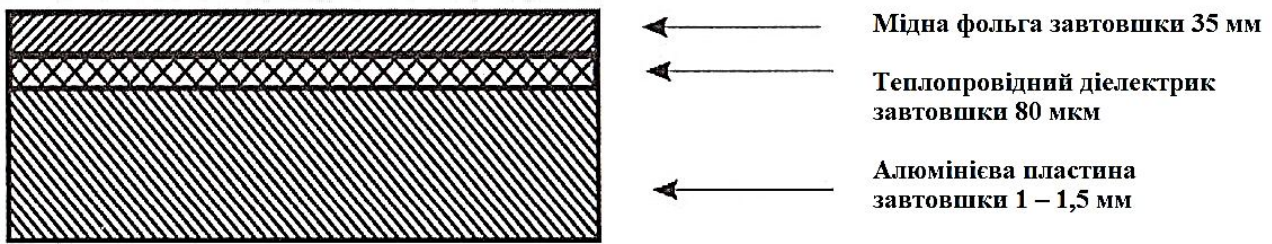


Рисунок 3.21 – Структура підкладки з фольгованого міддю алюмінію

Альтернативою матеріалу MC PCB є матеріал ALOX на основі нанопористого шару  $Al_2O_3$ , виготовленого методом анодування на алюмінієвій пластині завтовшки 0,3–1,5 мм. Локальні ділянки цієї пластини окиснюються й перетворюються в пористий оксид алюмінію, пори в якому заповнюються діелектричним матеріалом. На поверхні з мідного шару створюється рельєф для монтажу (рис. 3.17). У підсумку виходить виріб із теплопровідністю кераміки (10–16 Вт/м · К), але завдяки відсутності операції формування отворів його вартість виходить значно нижчою (одношарова плата коштує 5,5–6,0 дол. США/дм<sup>2</sup>, що майже відповідає вартості одношарової плати MC PCB (4–4,5 дол. США/дм<sup>2</sup>). Альтернативою MC PCB є також і посріблена мідна плата (корпус) типу lead frame 3003 або 5002, для яких вартість на ринку України на сьогодні не перевищує 0,7 дол. США/шт. для модулів потужністю до 10 Вт і 1,3 дол. США/шт. для модулів потужністю від 20 Вт до 100 Вт.

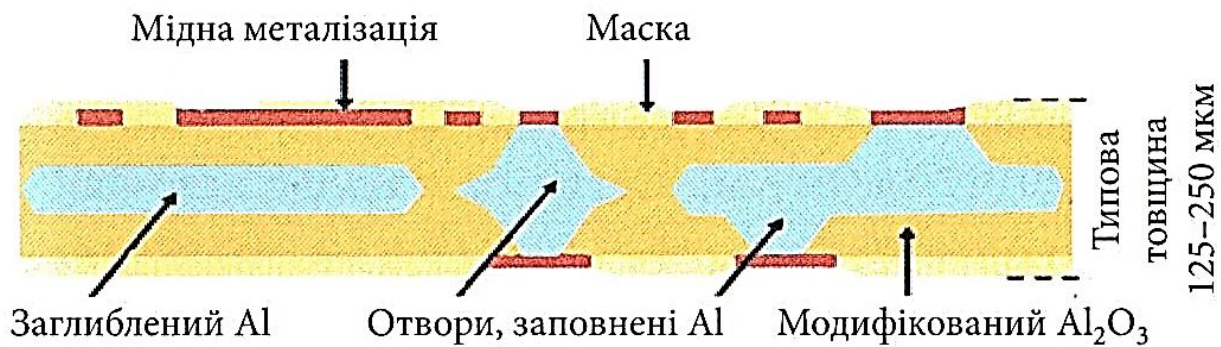


Рисунок 3.22 – Підкладка ALOX, отримана анодуванням алюмінію

Як відомо, у світлодіодній технології діє так званий закон Хайтца (аналогічний закону Мура в мікроелектроніці), згідно з яким ціна за один люмен світла падає в 10 разів за 10 років, а потужність, випромінювана окремим випромінювачем за цей самий час, зростає в 20 разів. У зв'язку з цим можна чекати, що основні витрати в процесі виготовлення світлодіодних модулів будуть постійно перерозподілятися між вартістю різних варіантів високотеплопровідних конструкцій плат модулів, конструкцій світловипромінювальних областей і технологією складання модулів.

У 1994 році німецька компанія ALANOD змогла створити матеріал нового покоління на основі алюмінію MIRO з покриттям, нанесеним методом вакуумного напилювання (PVD), що забезпечує відбиття світла до 95 % у разі повної відсутності викривлень кольоровості й інтерференції (рис. 3.23). Це забезпечило серйозний прорив у технології, оскільки раніше коефіцієнт світловідбивання не перевищував 87 %.

Для додаткового посилення відбивальної здатності анодованого алюмінію в спектральному діапазоні видимого світла на попередньо оброблену алюмінієву смугу в безперервному циклі осаджуються пари речовин, що мають високу світловідбивальну здатність та посилюють світловідбивання. У підсумку виходять поверхні з дзеркальними й світлорозсіювальними властивостями, що відбивають 95 % падаючого на них світла. Експлуатаційний коефіцієнт корисної дії світильників із рефлекторами з алюмінію MIRO збільшується на 10–20 %. Поверхні MIRO абсолютно вільні від інтерференційного забарвлення. Для роботи з MIRO не потрібно ніякого додаткового машинного обладнання – обробка MIRO будь-якої якості нічим не відрізняється від роботи зі звичайною анодованою алюмінієвою смугою.

У 2003 році компанія ALANOD удосконалила процес нанесення шарів на алюмінієву смугу для збільшення коефіцієнта загального світловідбивання до 98 %, використовуючи для цих цілей спеціально побудовану лінію вакуумної обробки, призначену винятково для нанесення срібла й виробництва продукту з унікальними властивостями – MIRO-SILVER.

Коефіцієнт загального світловідбивання цього матеріалу досягає 98 %. Унікальний і коефіцієнт відбиття сонячного світла 95 %, що дає змогу використовувати енергію сонячного світла за допомогою сонячних дзеркал. Цей високотехнологічний алюмінієвий матеріал ідеальний для застосування в LED світлотехнічних виробках.

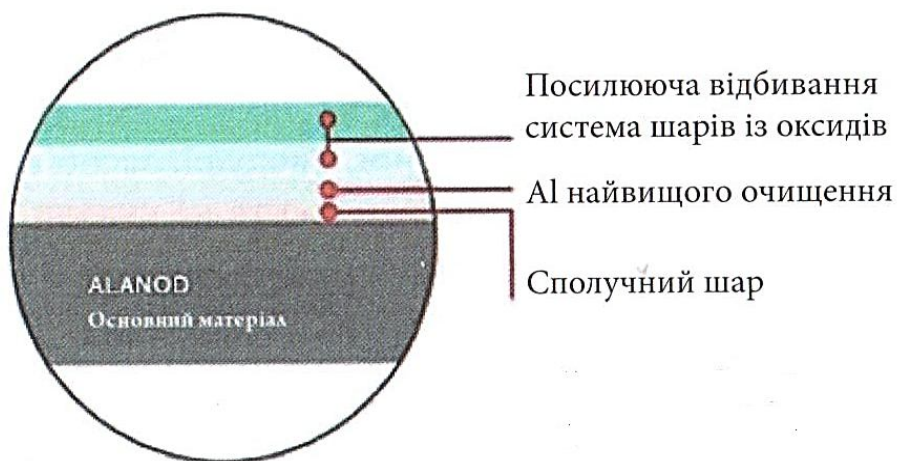


Рисунок 3.23 – Структура матеріалу MIRO

У світловодах, світлонапрямних пластинах і рефлекторах матеріал MIRO-SILVER не тільки забезпечує високий ККВ, його поверхня має відмінну колірну нейтральність навіть після багаторазових відбиттів світла. Важливо відзначити, що з часом первісні властивості поверхні ні в якій мірі не міняються. MIRO-SILVER має відмінну стійкість до ультрафіолетового випромінювання. Як і всі інші матеріали з маркою MIRO, він стійкий стосовно корозії та температури. Алюмінієва смуга MIRO-SILVER виготовляється завтовшки від 0,2 мм до 0,8 мм і завтовшки до 1 250 мм.

З 2012 року компанія ALANOD почала робити нові типи матеріалів спеціально для багатокристальних світлодіодних модулів із дзеркалізованими підкладками на основі матеріалів MIRO і MIRO-SILVER товщиною до 1,5 мм типу MIRO 17 Com, MIRO-SILVER 17 Com, MIRO 47 Com, MIRO-SILVER 47 Com із загальним коефіцієнтом відбиття 95–98 % з орієнтовною вартістю до 25 дол. США/м<sup>2</sup> [6].

Отже, у конструкції світлодіодного випромінювача для ламп-ретрофітів можна виокремити два основні елементи, які важливі для створення його оптимального конструктивно-технологічного рішення з погляду вартості одиниці світлового потоку – дол. США (грн)/лм. Це насамперед світлодіод і плата, на яку він монтується. А вибір типів світлодіодів, що відрізняються за потужністю, типів тримачів і конструкцій друкованих плат з основами, матеріали яких відрізняються за тепловим опором, а також технології складання й визначають в остаточному підсумку їхню конкурентну вартість і комерційну привабливість.

### **3.11 Нові підходи до створення світлодіодних модулів**

Сьогодні для побутового й загальнопромислового освітлення розроблені лампи-ретрофіти, у яких як випромінювачі малої й середньої потужності широко застосовуються плоскі COB і SMD світлодіодні модулі. Модулі зазвичай виконуються у вигляді плоских круглих, кільцевих або багатокутних друкованих плат із металізованою, або виконаною на основі теплопровідної кераміки, основою, зі світлодіодами, що мають паралельні оптичні вісі. Світлодіодні модулі встановлюються в захисній світлорозсіювальній колбі (діаметром 50–60 мм) у тепловому контакті з пов'язаним із платою й винесеним із колби в навколишній простір радіатором охолодження. Повсюдне освоєння виробництва таких ламп обумовлене простотою конструкцію плоского світлодіодного модуля, засобів кріплення його на радіаторі охолодження, а також доступною та не складною технологією виробництва лампи. У лампах із цоколем E-27 для експлуатації у побутовій мережі джерела живлення (далі –

ДЖ) вбудовані в цокольну частину відсіку радіатора охолодження, який є загальним для світлодіодного модуля випромінювача й електронних плат керування світлодіодами (драйверів).

### **3.12 Багатокристалльні світлодіодні плоскі COB-модулі**

У компанії ТОВ «Світлодіодні технології Україна» були проведені дослідно-конструкторські роботи з розробки багатокристалльних плоских світлодіодних модулів для використання у вітчизняних світлодіодних лампах. Їхнє призначення – заміна ламп розжарювання й компактних люмінесцентних ламп побутового застосування з потужністю 40–50 Вт. Результатом роботи стало створення принципово нових в Україні багатокристалльних chip on board (COB) світлодіодних модулів із застосуванням високоефективних імпорتنних світловипромінювальних кристалів на сапфіровій підкладці) синього світла випромінювання типу EDI-EA1734 (0,3 Вт) компанії EDISON Optocorporation (Тайвань).

Для поліпшення теплових характеристик світлодіодних ламп була запропонована розроблена конструкція теплопровідної основи COB світлодіодного модуля. Ця конструкція становить збиральний вузол, у якому на дзеркалізованій круглій основі з матеріалу MIRO-SILVER 4270AG із загальним коефіцієнтом відбиття до 98 % і завтовшки 0,8 мм був установлений за допомогою теплопровідного клею високотеплопровідний мідний посріблений корпус типу LEAD FRAME 3003. Такий підхід забезпечив у світлодіодному модулі низький тепловий опір кристал-корпус (менше 1 °C/Вт) і можливість збільшення його світлової ефективності в складі світлодіодної лампи за рахунок додаткового перевідбиття світлового випромінювання в колбі розсіювача світла.

Більшість провідних світових виробників світлодіодних напівпровідникових кристалів практично не займаються виробництвом світлодіодних приладів. Усі ці компанії мають невеликі дослідні виробництва світлодіодних джерел світла, але не більш того, оскільки виготовлення кристалів і виробництво світлодіодних приладів – це різні типи виробництва (одні виробляють кристали, інші їх збирають у вироби). Провідні компанії виробляють кристали, компанії-партнери – купують і встановлюють їх у корпуси й на плати приладів і продають їх на ринку. Практично відбувається кооперація й інтеграція на міжнародному світлодіодному ринку. Це дає змогу досягти більших об'ємів виробництва й знизити вартість кінцевого виробу (світлодіода або світлодіодного модуля) для споживача.

Відтак компанії, які продають кристали, надають виробникам світлодіодних приладів технічні описи на кристали, сертифікати якості на кристали або партію кристалів, а також технологічні обмеження їх використання у виробництві. Крім того, компанії, які надають кристали, забезпечують технічну підтримку і, у разі необхідності, здійснюють технічний і технологічний контроль виробництва у виготовлювачів світлодіодних приладів. Зазвичай, усі супутні матеріали й компоненти для виробництва, а також устаткування закупаються відповідно до рекомендацій виробників кристалів у компаній-партнерів, що мають відповідну ліцензію на міжнародному ринку.

Світлодіодні МСОВ-модулі виготовляються з використанням високоефективних кристалів синього кольору світіння. Для одержання випромінення білого світла світіння з заданими характеристиками застосовуються люмінофори, параметри яких дають змогу одержувати необхідну колірну температуру, високу світлову ефективність і стабільність характеристик світлодіодних модулів. Матеріали люмінофорів і параметри люмінофорних шарів оптимізуються відповідно до конструкції відбивачів світлодіодних плат з метою одержання максимально можливої ефективності перетворення синього кольору випромінення.

У білих світлодіодних модулях застосовуються високоефективні над яскраві кристали синього кольору світіння з розмірами 17 мм × 34 мм, 30 мм × 30 мм, 35 мм × 35 мм, 38 мм × 38 мм, 45 мм × 45 мм тощо. Зазвичай, світлодіодні модулі виконуються у вигляді корпусу – рамки з полімерного стабільного високотемпературного матеріалу, розміщеного на металевій основі з високою теплопровідною здатністю, на яку встановлюються кристали світлодіодів. Металеві основи вибираються з певними властивостями й щільністю матеріалу, що сприяють рівномірному розподілу тепла, яке виділяється кристалами при генерації світлового випромінення. Це, зі свого боку, сприяє ефективному відводу (передачі) тепла на зовнішній радіатор світлодіодних виробів. Зрозуміло, у світлодіодних приладах зовнішніми радіаторами є їхні металеві корпуси. Технологічні операції проводяться в «чистих кімнатах», тобто в таких приміщеннях, де створені певні умови з заданою вологістю й температурою. Крім того, у цьому приміщенні встановлені системи очищення повітря, захисту від пилу й статичної електрики. Усі робочі місця обладнані антистатичними матеріалами й індивідуальними засобами для захисту від статичної електрики. Виробничий персонал має бути забезпечений технологічним одягом, взуттям і респіраторами з системою фільтрації, щоб уникнути потрапляння в повітря приміщення сторонніх часток.

Усі операції проводяться на спеціальних автоматизованих або напівавтоматизованих комплексах, що дає змогу одержати повторюваність



характеристик і високу якість світлодіодних модулів. У процесі кожної технологічної операції здійснюється контроль і після кожної операції проводиться тестування якості. Тільки вироби, які пройшли всі етапи технологічного контролю, допускаються на наступну технологічну операцію. У процесі багатоступінчастого контролю й перевірки якості на всіх етапах забезпечується висока якість готових виробів і висока стабільність й повторюваність характеристик.

Виготовлення світлодіодних COB-модулів починається з установки кристалів на металеву основу корпуса світлодіодного модуля в поле рамки світловипромінювальної області. Кристали монтуються за допомогою адгезивів з високою теплопровідністю. Після установки всіх кристалів плати СДМ проходять витримку протягом необхідного часу з метою стабілізації параметрів теплопровідних адгезивів і досягнення готовності до наступної технологічної операції. Потім за допомогою процесів ультразвукового зварювання здійснюється з'єднання кристалів в електричну схему золотим дротом. Якість приварювання й надійність контактів перевіряється в автоматичному режимі. Після цього тестується все схемне з'єднання кристалів у світлодіодному модулі.

Далі заготовки світлодіодних модулів із розвареними кристалами надходять на робоче місце заливання люмінофора. Для цього використовуються спеціально приготовлені люмінофорні гелі на основі силіконових полімерів. Модуль заливається люмінофором до певного рівня, після чого він витримується протягом деякого часу до заданого значення в'язкості люмінофорного шару. Далі проводиться попереднє тестування працездатності й світлотехнічних характеристик СДМ. Для цього використовується комплекс засобів вимірів як електричних, так і оптичних параметрів світлодіодних модулів. Після підтвердження характеристик і відповідності критеріям якості, він надходить на наступну технологічну операцію.

Наступна технологічна операція полягає в переміщенні світлодіодних модулів у теплову камеру, яка має запрограмований температурний режим. У камері відбувається полімеризація люмінофорного компаунда й одержання ним певних заданих фізико-технічних властивостей. Після цього модулі ще раз передаються на наступну операцію. Наступна операція полягає у витримуванні світлодіодних модулів при кімнатній температурі для стабілізації фізико-технічних параметрів. Після цієї операції світлодіодні модулі тестують й маркують. Після чого їх пакують, і вони надходять на склад готової продукції. На складі, у приміщенні необхідно підтримувати певний температурно-вологісний режим для зберігання світлодіодних модулів.



#### 4 КУТ ВИВОДУ ВИПРОМІНЕННЯ

Якщо світло на межі між напівпровідником та повітрям зазнає повне внутрішнє відбиття, випромінення із напівпровідника не виходить назовні. Світло може вийти за межі напівпровідника, якщо кут падіння променів на межу розділення близький до  $90^\circ$ . Повне внутрішнє відбиття можливе для променів, які падають не під прямим кутом, а при їх майже ковзному падінні. Повне внутрішнє відбиття сильно знижує зовнішній квантовий вихід випромінення, особливо для світлодіодів із матеріалів із високими значеннями показників заломлення.

Припустимо, що  $\varphi$  – кут падіння променів на межу розділу напівпровідник-повітря (з боку напівпровідника). Тоді кут відбиття цього променя від поверхні розділу  $\Phi$  можна знайти із закону Снеліуса (який іноді називають законом Снеля):

$$\bar{n}_S \cdot \sin \varphi = \bar{n}_{air} \cdot \sin \Phi, \quad (4.1)$$

де  $\bar{n}_S$ ,  $\bar{n}_{air}$  – показники заломлення напівпровідника та повітря.

На рисунку 4.1 зображено, як використовуючи умову  $\Phi = 90^\circ$ , можна знайти критичний кут повного внутрішнього відбиття. Із закону Снеліуса випливає, що

$$\sin \varphi_c = \left( \frac{\bar{n}_{air}}{\bar{n}_S} \right) \cdot \sin 90^\circ = \frac{\bar{n}_{air}}{\bar{n}_S}, \quad (4.2 \text{ а})$$

$$\varphi_c = \sin^{-1} \left( \frac{\bar{n}_{air}}{\bar{n}_S} \right), \quad (4.2 \text{ б})$$

Напівпровідники зазвичай мають досить високі значення показників заломлення. Так, для GaAs – цей показник дорівнює 3,4. Підставляючи це значення у рівняння (4.2), отримуємо дуже малу величину критичного кута  $\sin \varphi_c \approx \varphi_c$ , який властивий повному внутрішньому відбиттю в цьому матеріалі. Тому в таких випадках можна скористатися наближенням. Тоді критичний кут повного внутрішнього відбиття знаходиться за допомогою виразу

$$\varphi_c \approx \frac{\bar{n}_{air}}{\bar{n}_S}. \quad (4.3)$$

Кут повного внутрішнього відбиття визначає *кут виводу випромінення*. Промені світла, що попадають до конуса з таким кутом, можуть вийти за межі напівпровідника. Інші промені цієї можливості не мають.

Для визначення частки світла, яка попадає у кут виведення випромінення, потрібно розрахувати площу поверхні сферичного конуса з радіусом  $r$ . На

рисунку 4.1, б представлено, як можна знайти площу сегмента поверхні сфери, що визначається радіусом  $r$  та кутом  $\varphi_c$  :

$$A = \int dA = \int_0^{\varphi_c} 2\pi \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot r d\varphi = 2\pi \cdot r^2 \cdot (1 - \cos \varphi_c). \quad (4.4)$$

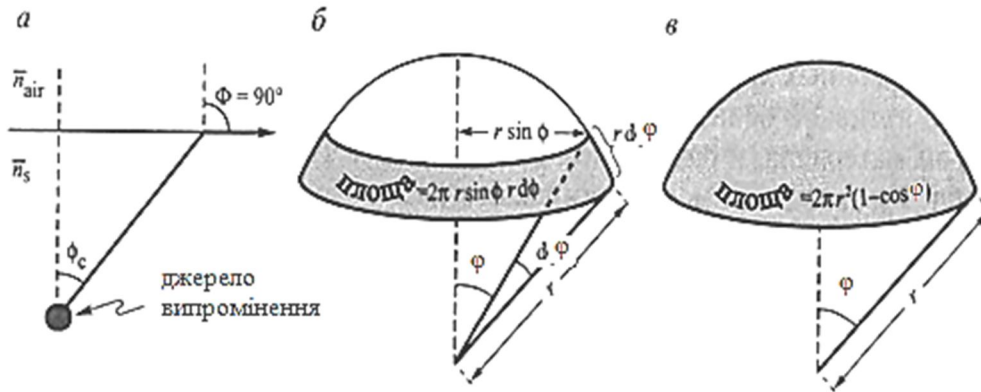


Рисунок 4.1 – Визначення кута виводу випромінювання за критичним кутом  $\varphi_c$ (а); елемент поверхні  $dA$  (б); площа сегменту поверхні сфери, що визначається радіусом  $r$  та кутом  $\varphi_c$  (в)

Припустимо, що світло випромінюється точковим джерелом із потужністю  $P_{source}$ , яке розташоване всередині напівпровідника. Тоді потужність випромінювання, що виходить із напівпровідника, визначається виразом:

$$P_{escape} = P_{source} \cdot \frac{2\pi \cdot r^2 \cdot (1 - \cos \varphi_c)}{4\pi r^2}, \quad (4.5)$$

де  $4\pi r^2$  – площа поверхні всієї сфери радіуса  $r$ .

Із цього розрахунку бачимо, що тільки частка світла, яка випромінюється всередину напівпровідника, може вийти за його межі. Величина цієї частки дорівнює:

$$\frac{P_{escape}}{P_{source}} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \varphi_c). \quad (4.6)$$

Оскільки матеріалам із високими показниками заломлення властиві порівняно невеликі значення критичних кутів повного внутрішнього відбиття, конус можна зобразити у вигляді степеневого ряду. Тоді, опускаючи члени вище другого порядку, можна записати вираз:

$$\frac{P_{escape}}{P_{source}} \approx \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varphi_c^2}{2} \right) \right] = \frac{1}{4} \cdot \varphi_c^2. \quad (4.7)$$

Використовуючи наближене рівняння (3.3), отримуємо:

$$\frac{P_{escape}}{P_{source}} \approx \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\bar{n}_{air}}{\bar{n}_S} \right)^2. \quad (4.8)$$

Це співвідношення є важливим параметром світлодіодів. Оскільки більшість напівпровідників мають високі значення показників заломлення ( $>2,5$ ), тільки декілька відсотків світла, що генерується всередині матеріалу, виходить за межі планарних світлодіодів. Для напівпровідникових світлодіодів із невеликими значеннями заломлення (порядку 1,5) та полімерних світлодіодів ця проблема стоїть менш гостро.

#### 4.1 Просторовий розподіл випромінення (діаграми спрямованості) світлодіодів

Усі світлодіоди мають власний *просторовий розподіл випромінення у дальньому полі, або діаграму спрямованості* (у світлотехніці також прийнято термін «крива сили світла»).

Інтенсивність випромінення у заданій точці, що випромінюється в одиницях Вт/см<sup>2</sup>, визначається її полярними координатами, тобто відстанню від цієї точки до світлодіода та кутом між ним та горизонтальною площиною. Для знаходження повної оптичної потужності світлодіода необхідно обчислити інтеграл від інтенсивності випромінення по всій поверхні сфери:

$$P = \iint_{A\lambda} I(\lambda) d\lambda dA, \quad (4.9)$$

де  $I(\lambda)$  – спектральна інтенсивність випромінення, Вт/(нм·см<sup>2</sup>);  
 $A$  – площа поверхні сфери.

#### 4.2 Ламбертівський розподіл випромінення

Різниця між показниками заломлення випромінювального матеріалу та навколишнього середовища призводить до анізотропії просторового розподілу випромінення. Планарним діодам на основі матеріалів із високими значеннями показників заломлення властивий ламбертівський розподіл випромінення. На рисунку 4.2 зображено точкове джерело випромінення, яке розташоване набагато нижче межі розділу напівпровідник-повітря. Промінь, що виходить із джерела світла під кутом  $\varphi$  із нормаллю до поверхні розподілу, заломлюється під кутом  $\Phi$  також відносно нормалі. Кути  $\varphi$  та  $\Phi$  зв'язані законом Снеліуса, тому для малих кутів  $\varphi$  ( $\sin \varphi \approx \varphi$ ) можна записати співвідношення:

$$\bar{n}_S \cdot \sin \varphi \approx \bar{n}_S \cdot \varphi = \bar{n}_{air} \cdot \sin \Phi. \quad (4.10)$$

Промінь світла, що випромінюється у напівпровіднику в межах конуса з кутом  $d\varphi$ , відбившись від поверхні розділу, попадає у повітря в сектор, що визначається кутом  $d\Phi$  (усе відносно нормалі) (рис. 4.2).

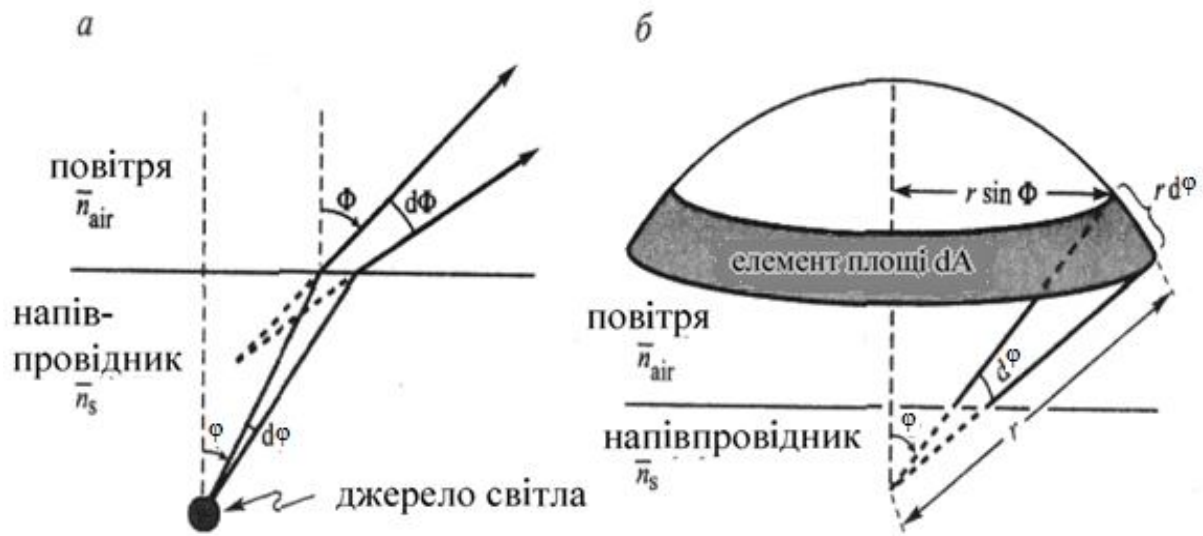


Рисунок 4.2 – Геометрична модель, що використовується для виводу рівняння для ламбертівського розподілу: а – світло, яке випромінюється у межах кута  $d\varphi$  у середині напівпровідника, в повітря випромінюється у межах кута  $d\Phi$ ; б – ілюстрація елемента поверхні сегмента сфери

Диференціюючи вираз 4.10 за кутом  $\Phi$  і розв'язуючи отримане рівняння відносно  $d\Phi$ , одержимо:

$$d\Phi = \frac{\bar{n}_s}{\bar{n}_{air}} \cdot \frac{1}{\cos \Phi} d\varphi. \quad (4.11)$$

Із закону збереження енергії маємо, що потужність оптичного випромінювання у межах кута  $d\varphi$  у напівпровіднику повинна дорівнювати оптичній потужності випромінювання у повітрі у межах кута  $d\Phi$ , тобто

$$I_s \cdot dA_s = I_{air} \cdot dA_{air}, \quad (4.12)$$

де  $I_s$ ,  $I_{air}$  – інтенсивність випромінювання у напівпровіднику та повітрі, виміряні в одиницях Вт/м<sup>2</sup>.

З огляду на циліндричну симетрію діаграми спрямованості, вибираємо елемент поверхні, який продемонстрований на рисунку 4.2. Площа цього елемента визначається виразом:

$$dA_{air} = 2\pi \cdot r \cdot \sin \Phi \cdot r d\Phi. \quad (4.13)$$

Використовуючи рівняння (4.10) і (4.11), отримуємо:

$$dA_{air} = 2\pi \cdot r^2 \cdot \frac{\bar{n}_S^2}{\bar{n}_{air}^2} \cdot \frac{1}{\cos \Phi} \cdot \varphi d\varphi. \quad (4.14)$$

Аналогічно цьому, площа елемента поверхні напівпровідника визначається:

$$dA_S = 2\pi \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot r d\varphi \approx 2\pi \cdot r^2 \cdot \varphi d\varphi. \quad (4.15)$$

Інтенсивність випромінення всередині напівпровідника на відстані  $r$  від поверхні знаходиться шляхом ділення повної потужності джерела світла на площу поверхні сфери радіуса  $r$ :

$$I_S = \frac{P_{source}}{4\pi r^2}. \quad (4.16)$$

Інтенсивність випромінення зовні напівпровідника на відстані  $r$  від поверхні знаходиться шляхом ділення повної потужності джерела світла на площу поверхні сфери радіуса  $r$ :

$$I_S = \frac{P_{source}}{4\pi r^2} \cdot \frac{\bar{n}_{air}^2}{\bar{n}_S^2} \cdot \cos \Phi. \quad (4.17)$$

Із цього виразу видно залежність інтенсивності випромінення за функцією косинуса від кута  $\Phi$ . Це означає, що інтенсивність світла максимальна при випромінюванні перпендикулярно поверхні напівпровідника при  $\Phi = 0^\circ$ . При куті  $\Phi = 60^\circ$  інтенсивність знижується до значення, яке дорівнює половині максимуму. На рисунку 4.3 схематично зображено ламбертівський просторовий розподіл випромінення (діаграма спрямованості, або, як прийнято у світлотехніці, крива сили світла) планарного світлодіода.

На рисунку 4.3 наведені приклади світлодіодів із поверхнями іншої геометричної форми та властиві їм просторові розподіли випромінення. Для півсферичного світлодіода типовий ізотропний просторовий розподіл із випромінюючою областю у центрі сфери. При параболічній формі поверхні розподіл випромінення має яскраво виявлену спрямованість. Але світлодіоди з параболічною та півсферичною поверхнями значно складніше виготовити, ніж планарні світлодіоди.

Повну потужність випромінення, що виведена у повітря, можна знайти, інтегруючи інтенсивність випромінення вздовж усієї поверхні півсфери:

$$P_{air} = \int_0^{90^\circ} I_{air} \cdot 2\pi \cdot r \cdot \sin \Phi \cdot r d\Phi. \quad (4.18)$$

Підставляючи рівняння (4.17) у (4.18) та враховуючи, що  $\cos \Phi \cdot \sin \Phi = (1/2) \cdot \sin(2\Phi)$ :

$$P_{air} = \frac{P_{source}}{4\pi r^2} \cdot \frac{\bar{n}_{air}^2}{\bar{n}_S^2}. \quad (4.19)$$

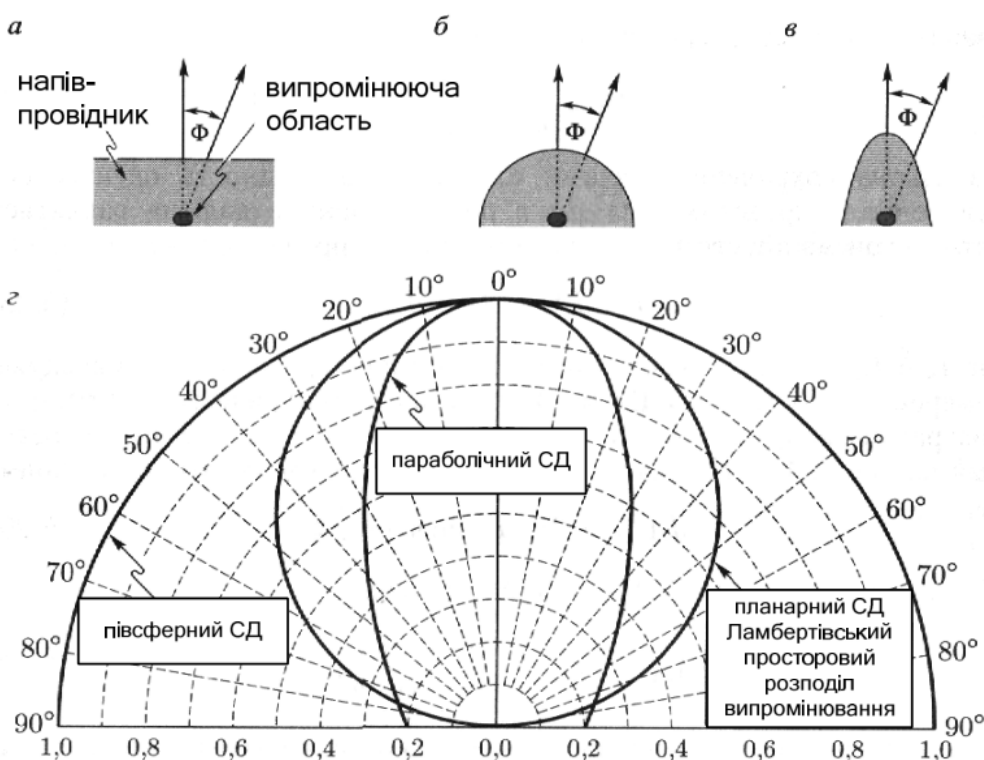


Рисунок 4.3 – Світлодіоди з планарною (а), півсферичною (б) та параболічною (в) поверхнями; просторовий розподіл випромінення різних типів світлодіодів (г). При  $\Phi = 60^\circ$  інтенсивність ламбертівського розподілу випромінення зменшується до значення, яке дорівнює половині максимуму, що досягається при  $\Phi = 0^\circ$ . Приведені просторові розподіли нормовані так, що при  $\Phi = 0^\circ$  інтенсивність дорівнює 1

Отже, отримано результат, що є ідентичним рівнянню (4.8) це не дивно, оскільки потужність випромінення напівпровідника ( $P_{escape}$ ) повинна дорівнювати потужності випромінення у повітрі ( $P_{air}$ ).

Щоправда, варто відзначити, що у всіх наведених розрахунках не враховувались *формули Френеля* при відбитті на межі розділу напівпровідник-повітря. При нормальному падінні променів на поверхню втрати потужності випромінення за рахунок відбиття за формулами Френеля можна оцінити за відбиттям :

$$T = 1 - R = 1 - \left( \frac{\bar{n}_S - \bar{n}_{air}}{\bar{n}_S + \bar{n}_{air}} \right)^2 = \frac{4\bar{n}_S \bar{n}_{air}}{(\bar{n}_S + \bar{n}_{air})^2}. \quad (4.20)$$

У строгих розрахунках нехтувати втратами на френелівське відбиття не можна.

#### 4.2.1 Світлодіоди з корпусами з епоксидної смоли

Використання корпусів банеподібної форми з матеріалів із високими значеннями показників заломлення дає змогу значно підвищити коефіцієнт оптичного виводу світлодіодів  $\eta_{extract}$  за рахунок збільшення кута повного внутрішнього відбиття крізь поверхню напівпровідника. Із рівняння 3.7 випливає, що відношення коефіцієнтів оптичного виводу світлодіодів з епоксидним корпусом і світлодіодів без корпусу визначається виразом:

$$\frac{\eta_{epoxy}}{\eta_{air}} = \frac{1 - \cos \varphi_{c,epoxy}}{1 - \cos \varphi_{c,air}}, \quad (4.21)$$

де  $\varphi_{c,epoxy}$ ,  $\varphi_{c,air}$  – критичні кути повного внутрішнього відбиття на межах розділу напівпровідник-епоксидна смола та напівпровідник-повітря.

На рисунку 4.4 зображені розрахункові значення цього відношення при різних показниках заломлення епоксидної смоли. Бачимо, що в разі використання епоксидного корпусу з показником заломлення 1,5 ефективність стандартного напівпровідникового світлодіода зростає у 2–3 рази.

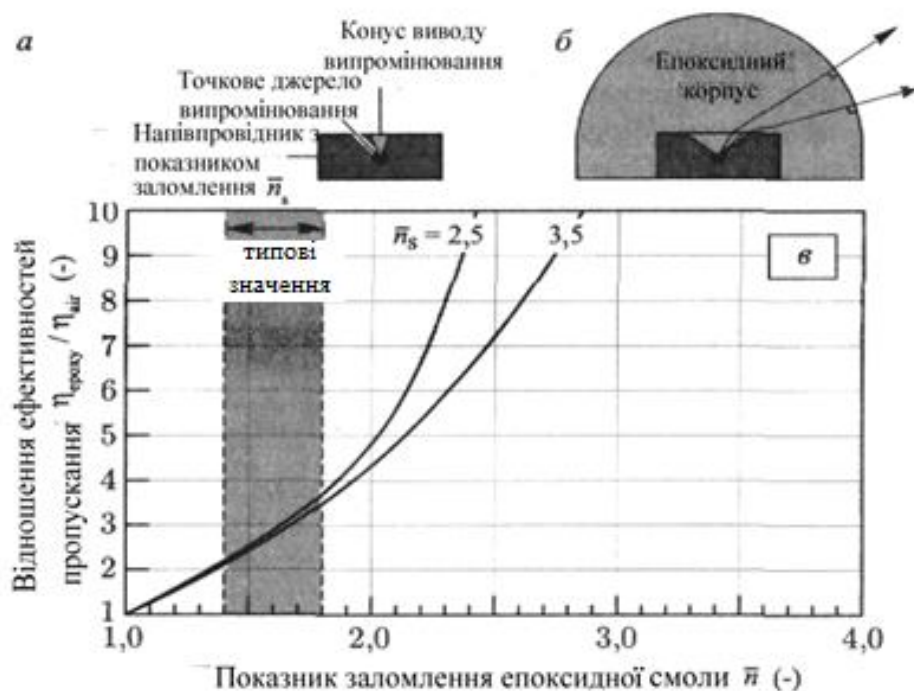


Рисунок 4.4 – Світлодіод без корпусу (а) та світлодіод з банеподібним корпусом з епоксидної смоли (б) (використання корпусу збільшує кут виводу випромінювання); розрахункові співвідношення значень коефіцієнта оптичного виводу світлодіоду з корпусом з епоксидної смоли та без нього (в). Показники заломлення стандартних епоксидних смол лежать в інтервалі 1,4–1,8 (Nuese et al., 1969)

З рисунка 4.4 бачимо, що завдяки банеподібному корпусу з епоксидної смоли, світло падає на межу розділу епоксидна смола-повітря під кутом близько  $90^\circ$ .

На цій межі практично не відбувається втрат, що пов'язані з повним внутрішнім відбиттям. Використання корпусів не тільки збільшує зовнішній квантовий вихід випромінювання світлодіодів але й дає змогу змінювати просторовий розподіл випромінювання. Так, для створення вузькоспрямованих світлодіодів застосовують сферичні корпуси, які відіграють роль лінз. Оскільки полімери мають невеликі показники заломлення, полімерні корпуси незначно змінюють зовнішній квантовий вихід світлодіодів.

#### 4.2.2 Покращені структури корпусів світлодіодів

У роботі Лі та ін. (Lee et al., 2004) описані корпуси світлодіодів із градієнтною зміною показника заломлення, що складаються з декількох шарів матеріалів із різними показниками заломлення. Шари з найбільшим показником перебувають у безпосередньому контакті з напівпровідниковим кристалом.

Зовнішні шари корпусу мають менші показники. Корпуси з градієнтними змінами показника заломлення забезпечують більш високі коефіцієнти оптичного виводу випромінювання, ніж корпуси з постійним показником заломлення. Іноді до складу матеріалів для виготовлення корпусів світлодіодів вводять спеціальні мінеральні добавки, що примушують світло відбиватись, заломлюватись та розсіюватись, що робить діаграму спрямованості випромінювання коловою та ізотропною. У багатоколірних світловипромінювальних пристроях (наприклад у багатокристальних світлодіодах білого світіння) такі добавки дозволяють отримувати рівномірний розподіл кольору. Як мінеральні добавки, зазвичай, застосовуються оптично прозорі речовини –  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  і  $\text{BaSO}_4$ , показники заломлення яких відрізняються від показника матеріалу корпусу (Reeh et al., 2003). У роботі (Lester et al., 1998) запропоновано вводити до матеріалу для корпусів світлодіодів наночастинки, що мають високий показник заломлення, наприклад оксидів магнію, титану, ітрію, цирконію, алюмінію,  $\text{GaN}$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnSe}$ . Наночастинки, які вбудовані у первісний матеріал (зазвичай, полімер), не викликають розсіювання світла, якщо вони розподілені рівномірно та їхній розмір набагато менше довжини хвилі випромінювання. Показник заломлення матеріалу з введеними наночастинками визначається таким виразом:

$$\bar{n} = \frac{\bar{n}_{host} \cdot V_{host} + \bar{n}_{nano} \cdot V_{nano}}{V_{host} + V_{nano}} \quad (4.22)$$

де  $V_{host}$  та  $V_{nano}$  – об'єми первісного матеріалу й наночастинок.



У разі великої концентрації наночастинок показник заломлення матеріалу з вбудованими наночастинками може набагато перевищувати показник первісного матеріалу, що збільшує вихідний конус випромінення світлодіода й підвищує його коефіцієнт оптичного виводу.

### 4.3 Світлодіоди з кристалами різної геометрії

Багатократне відбиття випромінення всередині напівпровідників із високими показниками заломлення є однією з найважливіших проблем, із якою доводиться зіткнутись під час розробки потужних світлодіодів.

На рисунку 4.5 зображено приклад випромінення, що локалізоване всередині напівпровідника. За законом Снеліуса промінь світла, який випромінено в активній області, може піддатись повному внутрішньому відбиттю. У разі високих показників заломлення кут повного внутрішнього відбиття можна оцінити за допомогою такого наближеного співвідношення:

$$\alpha_c = \bar{n}_s^{-1}, \quad (4.23)$$

де  $\bar{n}_s$  – показник заломлення напівпровідника.

Критичний кут  $\alpha_c$  тут виражено у радіанах. Для матеріалів із високими показниками заломлення критичні кути невеликі. Наприклад, при показнику 3.3, критичний кут повного внутрішнього відбиття дорівнює всього  $17^\circ$ . Тому у цьому разі велика частина випромінюваного активною областю випромінення виявляється локалізованою всередині напівпровідника. Це локалізоване випромінення, зазвичай, поглинається товстою підкладкою. Через низьку якість та малу ефективність підкладки поглинання локалізованих у ній фотонів зазвичай супроводжується безвипромінювальною рекомбінацією електроннодіркових пар.

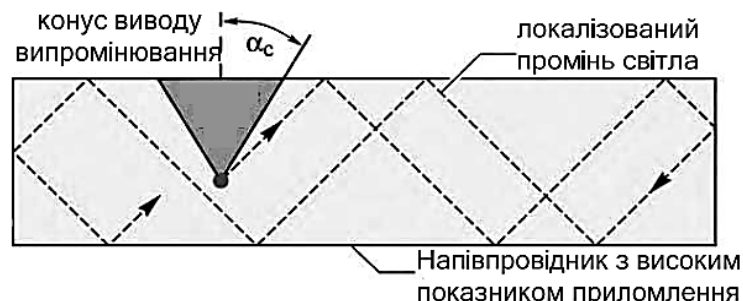


Рисунок 4.5 – Якщо кут конуса виводу випромінення більше кута  $\alpha_c$ , локалізований усередині напівпровідника у формі прямокутного паралелепіпеда промінь світла не має можливості вийти назовні через повне внутрішнє відбиття

З цією проблемою розробники зіткнулися у 60-х роках двадцятого століття, коли проектували перші світлодіоди. Саме тоді зрозуміли, що в цих питаннях форма кристала відіграє дуже важливу роль. Оптимальними є сферичні світлодіоди з точковими випромінювальними областями, які розташовані в їхньому центрі. На рисунку 4.6, а продемонстровано світлодіод такої форми. Промені світла, що випромінені точковою активною областю, падають на межу розділу напівпровідник-повітря під прямим кутом. Тому у таких світлодіодах не проявляється повне внутрішнє відбиття. Але варто відзначити, що, якщо на сфері світлодіода немає антивідбивного покриття, на межі розділу напівпровідник-повітря відбувається відбиття променів світла, що відоме як відбиття Френеля. Світлодіоди з півсферичним куполом, як й інших форм, наприклад у вигляді перевернутого зрізаного конуса, у порівнянні зі звичайними конструкціями, наприклад у формі прямокутного паралелепіпеда, мають більш високі коефіцієнти оптичного виводу випромінення (Carr, Pittman, 1963; Carr, Newman, 1964; Loebner, 1973).

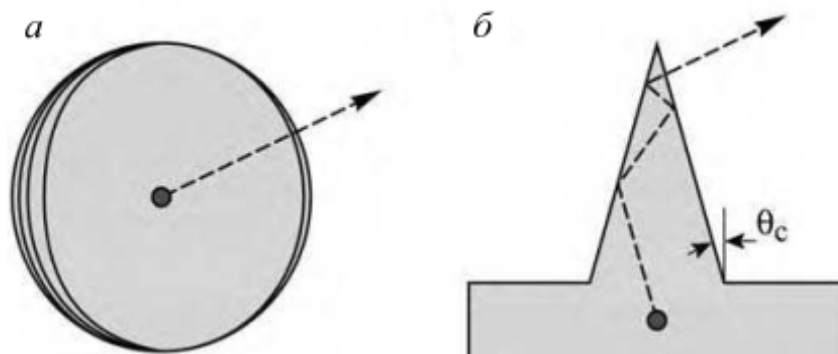


Рисунок 4.6 – Приклади світлодіодів різної геометричної форми, які мають високі значення коефіцієнтів оптичного виводу: а – сферичний світлодіод із точковою світловипромінювальною областю у центрі; б – конічний світлодіод

Але такі світлодіоди дуже коштовні у виготовленні, і тому їх ніхто не випускає. На жаль, сферичні світлодіоди з точковими джерелами випромінення у центрі також виявились вельми непрактичними пристроями. Це пов'язано з тим, що технологія виготовлення напівпровідників фактично є планарною, оскільки для епітаксiального вирощування напівпровідникових матеріалів використовують плоскі підкладки. Тому, застосовуючи традиційні планарні технології, виготовляти світлодіоди сферичної форми дуже складно. На рисунку 4.6, б зображено світлодіод конічної форми. Випромінення виводиться з активної області, що розташована у основи конуса або дещо нижче його. Проміні, що падають на межу конус-повітря, або пересікають її, або проходять назад через конус. При проходженні через конус проміні багаторазово відбиваються від його поверхні. Це призводить до того, що при попаданні на

межу напівпровідник-повітря їхній кут виходу стає значно більше початкового. Тому проміні покидають конус практично під прямим кутом до його поверхні. Але світлодіоди з такою цікавою концепцією також дуже коштовні у виготовленні. Із зазначеного зрозуміло, чому більшість світлодіодів мають кристал у формі прямокутного паралелепіпеда, який розроблено на рисунку 4.7, а. Кристали такої форми отримують при поздовжній різці підкладок уздовж їхніх природних площин.

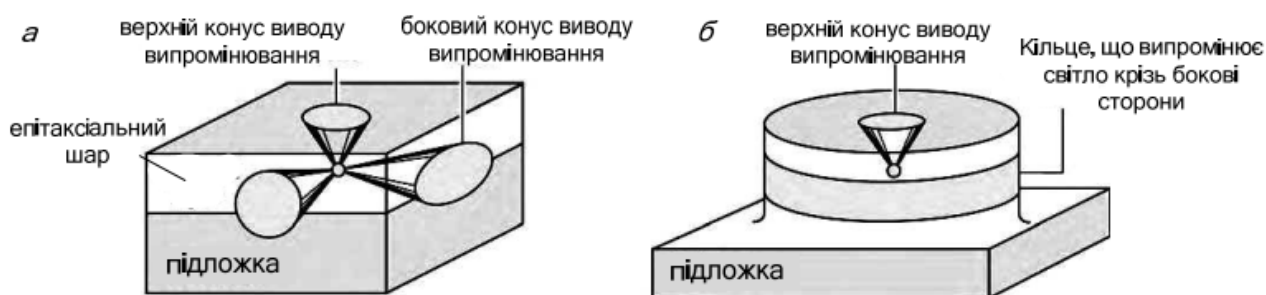


Рисунок 4.7 – Приклади світлодіодів різної форми: а – кристал світлодіода у формі прямокутного паралелепіпеда з шістьма конусами виводу випромінювання; б – кристал світлодіода циліндричної форми з верхнім конусом виводу випромінювання та кільцем, що випромінює світло через бокові грані

Розглядувані світлодіоди мають шість конусів виводу випромінювання: два перпендикулярних та чотири паралельних поверхні підкладки. Випромінювання нижнього конуса поглинається підкладкою, якщо ширина її забороненої зони менше, ніж забороненої зони активної області. Випромінювання чотирьох паралельних поверхонь конусів також частково поглинається підкладкою. Верхній металевий контакт без використання товстого шару розтікання струму перетинає шлях випромінюванню з верхнього конуса. Тому світлодіод простої прямокутної форми має низький коефіцієнт оптичного виводу. Але його незаперечною перевагою є низька вартість виготовлення. На рисунку 4.7, б наведено світлодіод циліндричної форми. Порівняно зі світлодіодами кубічної форми такі світлодіоди мають більш високі значення коефіцієнта оптичного виводу. Випромінювальне кільце заміняє чотири конуси, які паралельні поверхні під ложки, що й приводить до суттєвого підвищення цього коефіцієнта. Але під час виготовлення циліндричного світлодіода технологічний процес порівняно з формуванням прямокутних світлодіодів збільшується на одну стадію – стадію травлення. Світлодіод у формі перевернутої зрізаної піраміди є прикладом світлодіода з кристалом (Krames et al., 1999). На рисунку 4.8 подано структуру та фотографію світлодіода AlInGaP/GaP такого виду. Траєкторії променів показують як випромінювання, що збуджене в активній області світлодіода, виходить за межі напівпровідникового

кристала, зазнаючи одноразові або багаторазові внутрішні відбиття. Форма світлодіода у вигляді перевернутої зрізаної піраміди зменшує середню довжину шляху фотона всередині кристала, знижуючи в такий спосіб внутрішні оптичні втрати.

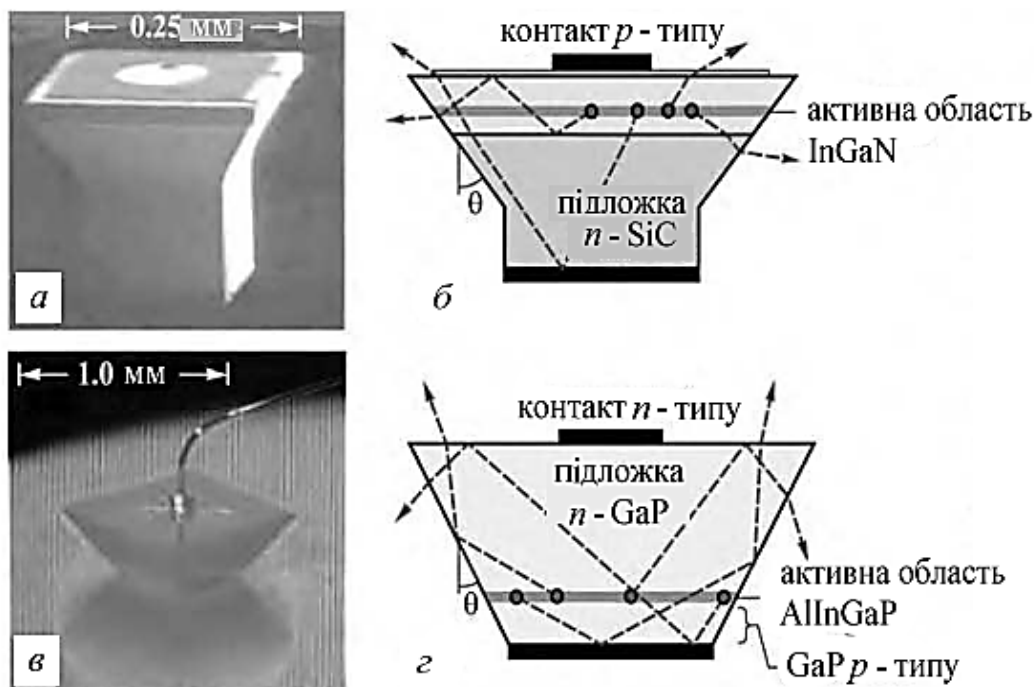


Рисунок 4.8 – Пристрій у формі зрізаної піраміди: а – синій випромінювач InGaN на підкладці SiC (промислова назва «Aton»); б – схема ходу променів, яка демонструє збільшення виводу випромінення; в – фотографія світлодіода AlInGaP/GaP; г – схема СД, що ілюструє підвищення його коефіцієнта оптичного виводу (Osram, 2001; Krames et al., 1999)

Вибрана геометрична форма світлодіода дає змогу мінімізувати довжину шляху променів усередині кристала. Для забезпечення максимальної ймовірності виходу фотонів за межі напівпровідника геометричні параметри світлодіода розраховують за допомогою спеціальних комп'ютерних програм, що моделюють траєкторії променів. Світлодіоди у формі перевернутих зрізаних пірамід – потужні пристрої з великою площею *p-n*-переходу: 500 мкм × 500 мкм. Їхня світлова віддача часто перевищує 100 лм/Вт – на сьогодні максимально досяжний рівень.

На рисунку 4.9 продемонстровано залежність зовнішнього квантового виходу пірамідальних світлодіодів від струму (Krames et al., 1999). Пік світлової віддачі 102 лм/Вт отримано для світлодіода оранжевого кольору,  $\lambda = 610$  нм, при струмі 100 мА. Це великі світлові віддачі більшості люмінесцентних (50–104 лм/Вт) і всіх металогалогенних (68–95 лм/Вт) ламп

високого тиску. Для жовтого кольору світіння,  $\lambda \approx 598$  нм, світлова віддача пірамідальних світлодіодів становить 68 лм/Вт. Це значення порівняне зі світловою віддачею 50-ватних натрієвих газорозрядних ламп високого тиску. Квантовий вихід світлодіодів пірамідальної форми червоного кольору світіння,  $\lambda \approx 650$  нм, дорівнює 55 % від максимального.

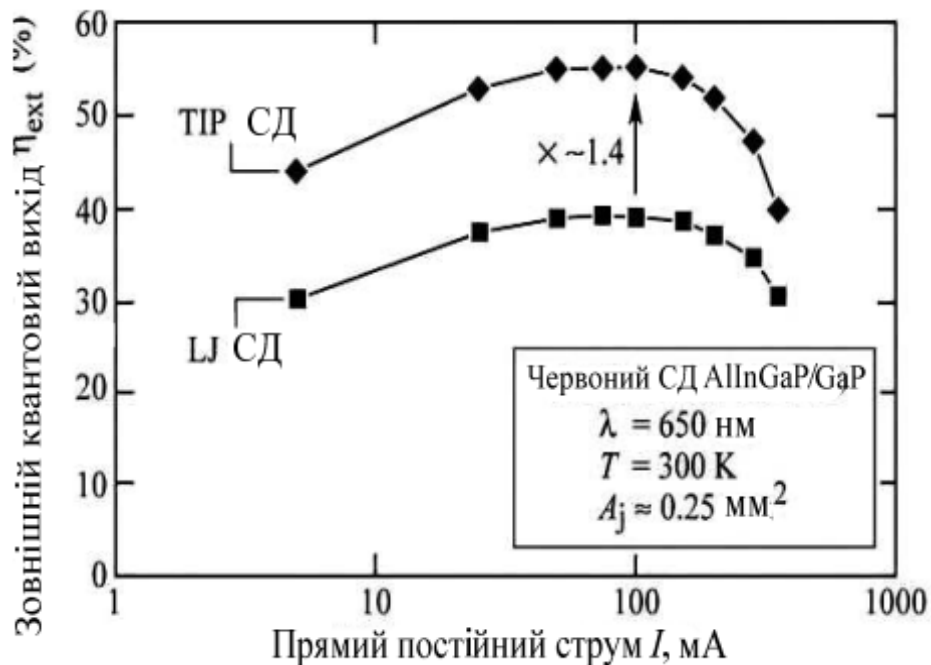


Рисунок 4.9 – Залежність зовнішнього квантового виходу випромінювання від струму для світлодіода червоного кольору світіння (650 нм), який має форму перевернутої зрізаної піраміди (ТІР), та світлодіода з великою площею *p-n*-переходу, що змонтований у корпусі потужної лампи (ЛІ). Коефіцієнт оптичного виводу світлодіода ТІР перевищує аналогічний показник світлодіода ЛІ у 1,4 рази та при 100 мА становить 55 % від максимального значення зовнішнього квантового виходу (Krames et al., 1999)

Під час роботи в імпульсному режимі (зі скважністю 100) квантовий вихід розглядуваних світлодіодів становить 60,9 % від максимального (на рисунку 4.9 дані не наведені), що відповідає нижній межі коефіцієнта оптичного виводу для пристроїв цього типу.

Світлодіодні кристали у формі прямокутних паралелепіпедів та циліндрів, зазвичай, виготовляють за технологією покрокової обробки однієї пластини. Світлодіодні кристали у формі перевернутої зрізаної піраміди виробляють декілька відрізняючись покроковим методом – покроковою різкою. Вартість виготовлення світлодіодів за технологією покрокової обробки однієї пластини є мінімальною порівняно з усіма іншими методами. У роботах Шміда та ін. (Schmid et al., 2000, 2001, 2002) для підвищення коефіцієнта оптичного

виводу світлодіодів запропоновано використовувати конічні елементи. Показано, що при застосуванні таких елементів в інфрачервоних світлодіодах GaAs можливо збільшення зовнішнього квантового виходу до 50 %. Але ці діоди мають досить низьку потужність випромінення, що пов'язано з вимогами до площі поверхні конусу виводу випромінення, завдяки яким область інжекції стає набагато менше загальної площі світлодіода.

#### 4.3.1 Застосування напівпровідників із текстурованою поверхнею

Другим ефективним способом підвищення коефіцієнта оптичного виводу світлодіодів є застосування напівпровідників із шершавою або текстурованою поверхнею. У роботах Шнітцера та ін. (Schnitzer et al. 1993) та Віндиша та ін. (Windisch et al., 1999, 2000, 2001, 2002) було показано, що для інфрачервоних світлодіодів GaAs під час застосування таких матеріалів можливе покращення зовнішнього квантового виходу до 50%. У роботі Зинцінгера та Янса (Sinzinger, Jahns, 1999) докладно обговорюються властивості напівпровідників з мікроструктурованими поверхнями та способи їх виготовлення. Після початкових позитивних повідомлень про збільшення коефіцієнта виводу у світлодіодах із текстурованими поверхнями, оптимізм розробників дещо знизився, оскільки виявилось, що у процесі розміщення напівпровідникових кристалів у полімерному корпусі всі ці переваги втрачаються й тільки безкорпусні діоди цього типу показують підсилення інтенсивності випромінення. Пізніше з'явилось ще декілька повідомлень про збільшення коефіцієнту виводу випромінення у світлодіодах на основі GaN із сильно текстурованими поверхнями, які отримувались методом рідинного хімічного травлення. До цього протягом багатьох років вважалось, що GaN не піддається

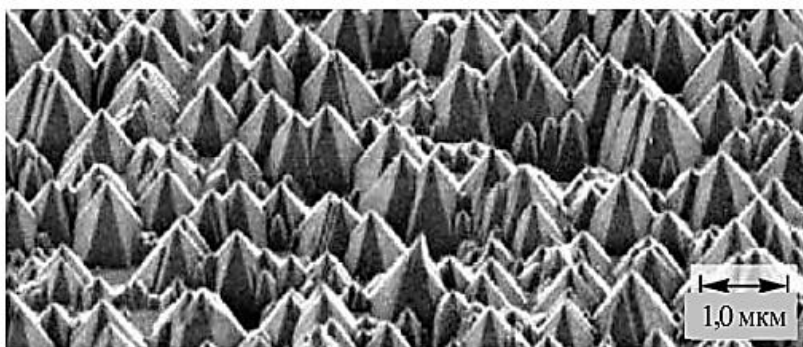


Рисунок 4.10 – Фотографія сильно текстурованої поверхні GaN, що отримана за допомогою електронного мікроскопа (Haerle, 2004)

рідинному травленню ніякими хімічними реагентами. Але було показано (Stocker et al., 1998a), що, хоча грань із кристала GaN дійсно не піддається травленню, на грані а та m можна діяти багатьма хімічними реагентами, наприклад гарячими розчинами КОН та  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Було також

показано (Stocker et al., 1998b, 2000), що вказані реагенти за своїм походженням

є органічними кристалами. Саме ця обставина дозволяє їм створювати пірамідальні структури, що зглажують поверхні на атомному рівні до стану, який придатний для виготовлення лазерів. Формувати суттєві шершавості на поверхнях кристалів GaN можна методами рідинного хімічного та фотоелектрохімічного травлення. На рисунку 4.10 зображено мікрознімок поверхні GaN із великою шершавістю (Haerle, 2004).

На рисунку 4.11 продемонстровано збільшення інтенсивності випромінення світлодіода InGaN із сильно текстурованою поверхнею (див. рис. 4.10), яке пов'язане зі зростанням коефіцієнта оптичного виводу (Haerle, 2004).

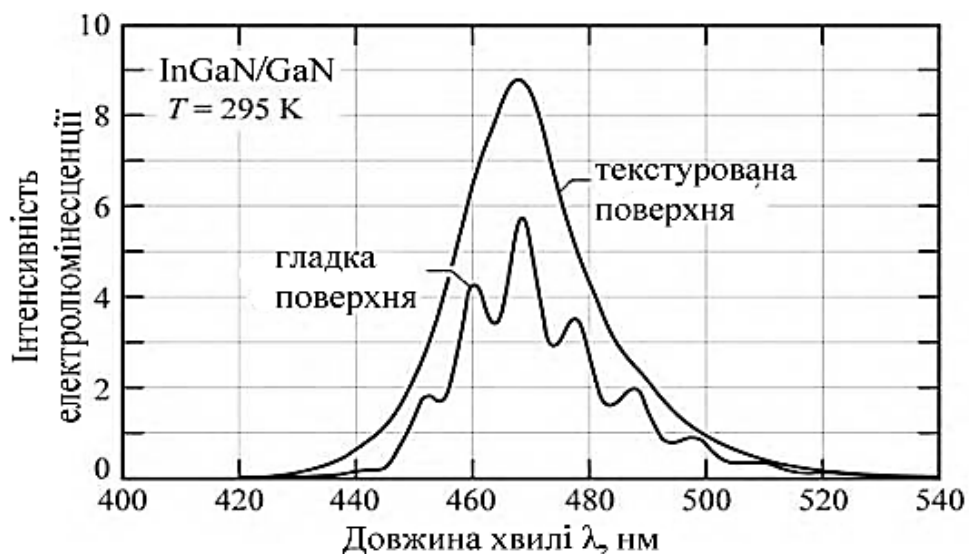


Рисунок 4.11 – Спектри випромінення світлодіодів InGaN голубого світіння з текстурованою поверхнею та без неї. На спектрі діода з гладкою поверхнею спостерігається інтерференційна модуляція, яка пов'язана з формуванням у його структурі резонатора Фабрі – Перо (Haerle, 2004)

Стверджується, що отримане збільшення вихідної потужності становить приблизно 40–50 %. Аналогічні результати були описані й в інших роботах (Gao et al., 2004; Fujii et al., 2004). Із рисунка 4.11 також бачимо, що інтерференційні структури, які спостерігаються у спектрах світлодіодів GaN із гладкими поверхнями, практично повністю відсутні у діодах із текстурованими шарами. Наявність на спектральній характеристиці інтерференційної модуляції пов'язано з формуванням у структурі світлодіода резонатора Фабрі – Перо, відбивачами якого є межі розділу GaN-повітря та сапфір-GaN (Billeb et al., 1997). На рисунку 4.12 наведені схеми хвилеводів з гладкою, слабо текстурованою та сильно текстурованою поверхнями. Рисунок 4.12, а відповідає хвилеводу з дзеркальною поверхнею, за межі якого оптичні моди вийти не можуть.

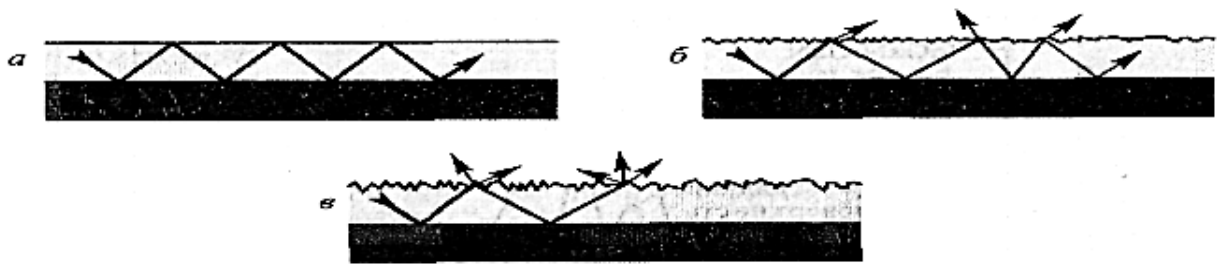


Рисунок 4.12 – Схеми хвилеводів з гладкою (а), слабо текстурованою (б) та сильно текстурованою (в) поверхнями. Першому типу хвилеводів властиве дзеркальне відбиття світлових хвиль, третьому типу – сильне розсіювання, а другому типу – суміш розсіювання та відбиття

У хвилеводі з сильно текстурованою (ламбертівською або дифузною) поверхнею (рис. 4.12, в) при кожній дії світлової хвилі з поверхнею межі хвилеводу покидають один або декілька фотонів. Проміжний випадок зображено на рисунку 4.12, б. Оскільки інтенсивність випромінення, яке виходить з поверхні, залежить від степені її шорсткості, бажано вміти кількісно оцінювати цей параметр. При вивченні поверхонь кристалів із InGaN за допомогою електронного мікроскопа було виявлено, що сильно текстуровані поверхні мають білий колір (Nichia, 2005). За цією ознакою можна визначати дифузні поверхні, які характеризуються сильним розсіюванням.



## 5 ЛЮМІНОФОРИ

Білий колір світіння можна отримати різними способами:

- комбінацією кристалів червоного, зеленого й синього кольорів світіння – RGB-метод;
- комбінацією кристала синього кольору світіння й люмінофора (на основі алюмоітрієвого гранату (YAG), який має смугу збудження в синій області та смугу випромінення в жовто-зеленій і червоній областях спектру;
- комбінацією кристала ультрафіолетового (УФ) світіння й декількох люмінофорів, які мають смугу випромінення в синій, зеленій і червоній областях спектра.

Переваги й недоліки вказаних трьох методів наведено в таблиці 5.1. На сьогодні основним способом одержання білого світлодіода вважається другий спосіб, коли комбінують кристал синього світіння та люмінофор. Для одержання холодного (діапазон корельованої колірної температури 5 000–10 000 К) і природного (діапазон 3 700–5 000 К) відтінків білого кольору використовується синій кристал на основі InGaN/GaN – гетороструктури й люмінофор на основі YAG. Для одержання теплого (діапазон корельованої колірної температури 2 600–3 700К) відтінка світіння до цієї комбінації додається додатній додатковий люмінофор, який випромінює в червоній області спектра.

Таблиця 5.1 – Переваги та недоліки основних методів випромінення білого кольору

Метод	RGB	Синій кристал + люмінофор	УФ-кристал + три люмінофори
Переваги	<ul style="list-style-type: none"> <li>- динамічна зміна кольорів;</li> <li>- можливість отримати мільйони відтінків;</li> <li>- теоретично ефективніший метод;</li> <li>- відсутнє УФ-випромінення</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- висока теоретична ефективність;</li> <li>- можливість отримати колірні температури від 3 200 К (теплий білий) до 10 000 К (холодний білий);</li> <li>- відсутнє УФ-випромінення</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- хороша рівномірність кольору;</li> <li>- відтінки залежать від люмінофорів і не залежать від накачування.</li> </ul>
Недоліки	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зміна кольору при нагріванні й деградації;</li> <li>- необхідна електроніка для керування;</li> <li>- погана кольоропередача;</li> <li>- низька ефективність світильника</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- можливі неоднорідності;</li> <li>- необхідний бінінг</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- низька світлова віддача;</li> <li>- низький термін служби;</li> <li>- можливе помутніння лінзи</li> </ul>

Типові спектри білих світлодіодів різних відтінків наведені на рисунку 5.1. Видно, що положення максимумів спектральних ліній світлодіодів холодного та природного діапазонів білого кольору практично однакове,

різняються тільки співвідношення інтенсивностей їх синьої і жовто-зеленої смуг – у холодному діапазоні; синя смуга більше, а жовто-зелена менш інтенсивна, ніж у природному діапазоні.

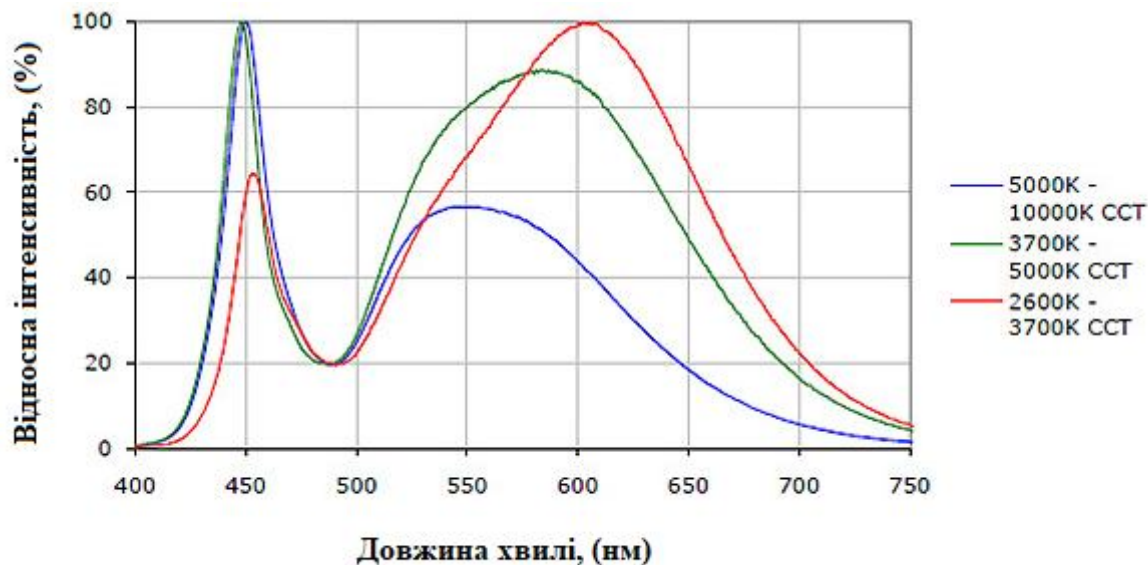


Рисунок 5.1 – Типові спектри білих світлодіодів холодного (5 000–10 000 K), природного (3 700–5 000 K) і теплого (2 600–3 700 K) діапазонів

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

Технологія виготовлення полягає в покращенні кристала люмінофором. Спочатку люмінофор додається до компаунда, яким заповнюється об'єм відбивача (рис. 5.2). Під час виготовлення потужних світлодіодів люмінофор змішується з оптичним гелем, і об'єм відбивача заповнюється такою композицією.

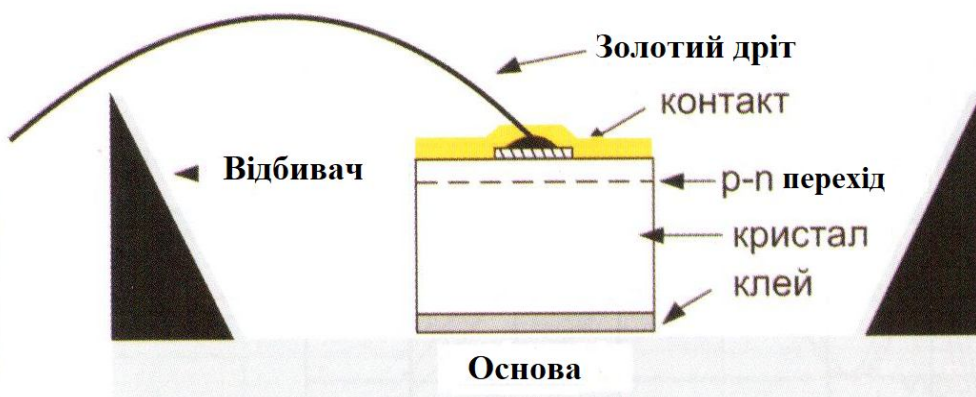


Рисунок 5.2 – Покриття кристала люмінофором під час виготовлення білого світлодіода. Метод заповнення люмінофором об'єма відбивача

Недоліком такої технології є наявність неоднорідності кольору, оскільки світло, що виходить із кристалу з різних його боків, проходить різну відстань у середині люмінофора, тому співвідношення синього й жовтого кольору для різних променів було різним. У процесі вдосконалення розробки білого світлодіода технологія нанесення люмінофора змінилася. Зараз більшість компаній використовує технологію покриття кристала люмінофором, тобто нанесення плівки люмінофора кристала (рис. 5.3).

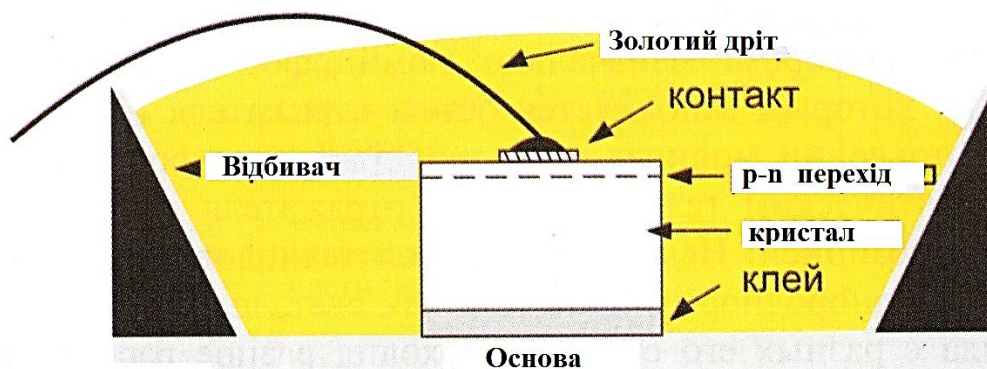


Рисунок 5.3 – Покриття кристала люмінофором під час виготовлення білого світлодіода. Метод нанесення плівки люмінофора на кристал

Техніка такого нанесення розрізняється у різних компаній – це може бути й нанесення гель-люмінофорної плівки, і пластинки із люмінофора, і нанесення люмінофора на поверхню кристала – кожна фірма використовує свою технологію. Але як результат можна відзначити, що колір у сучасних світлодіодів більшості виробників став однорідним, а оптичний вихід і ефективність випромінювання збільшилися.

Для оцінки світлової віддачі світлодіода можна використовувати таку емпіричну формулу:

$$\text{Світловідача } \frac{LM}{Bm} = K \eta_{elec} \cdot \eta_{extraction} \cdot \eta_{conv} \quad (5.1)$$

де  $\eta_{elec}$  – електрична ефективність, яка кількісно електронно-діркових пар із загальної кількості, які проходять через р-n-перехід кристала рекомбінують в активній області.

Внутрішній квантовий вихід  $\eta_{int}$  визначається за формулою 3.10. Коефіцієнт оптичного виводу випромінювання  $\eta_{extraction}$  визначається за формулою (3.11). Коефіцієнт перетворення люмінофора  $\eta_{conv}$  показує, яка кількість випромінювання світлодіодного кристала перетворена у випромінювання люмінофора. Коефіцієнт К показує світлову ефективність (або люмен-еквівалент) білого кольору, тобто світлову віддачу білого кольору, за

зовнішнього квантового виходу 100 %. У діапазоні колірної температури порядку 6 500 К значення К становить приблизно 340 лм/Вт.

У таблиці 5.2 наведені приблизні сучасні значення величини в формулі (5.1), а також можливі максимальні значення цих величин, які можна досягнути при подальшому розвитку технології.

В формулі (5.1) відображені величини, які впливають на світлову віддачу білого світлодіода.

Таблиця 5.2 – Оцінка світлової віддачі білого світлодіода

Показник	Мета, %	Реальність, %
Електрична ефективність, $\eta_{elec}$	95	80
Внутрішній квантовий вихід, $\eta_{int}$	100	80
Коефіцієнт оптичного виводу, $\eta_{extraction}$	90	70
Коефіцієнт перетворення люмінофора, $\eta_{conv}$	100	60

Проте для практичного застосування вона не зовсім підходить, необхідно провести її перетворення. Якщо користуватися зовнішнім квантовим виходом  $\eta_{ext}$ , то (5.1) можна переписати так:

$$\text{Світловідача } \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} = K \eta_{elec} \cdot \eta_{ext_{conv int}} \quad (5.2)$$

Цю формулу можна ще більш спростити, якщо врахувати, що добуток  $\eta_{elec} \cdot \eta_{ext}$  дорівнює ККД світлодіода  $\eta_{power}$ . У цьому разі формула (5.2) виглядає так:

$$\text{Світловідача } \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} = K \eta_{power} \cdot \eta_{conv} = K \frac{P}{V} \cdot \eta_{conv}, \quad (5.3)$$

Принцип змішування кольорів зображено на рисунку 5.4. Змішуються два кольори з координатами кольоровості  $(x1, y1)$ ,  $(x2, y2)$ . Для цього випадку  $L3 = P3 = 0$ .

Результуючий колір розташовано на прямій лінії, що поєднує координати кольоровості двох джерел світла. Отже, будь-який колір (зокрема білий), який розташований між двома точками на кольоровій діаграмі, може бути одержано шляхом змішування цих двох кольорів. На рисунку 5.4 також продемонстровано змішування трьох кольорів, що розташовані у червоній, зеленій та синій областях кольорової діаграми.

Три вибрані точки на діаграмі відповідають випромінюванню світлодіодів червоного, зеленого та синього світіння. Область всередині трикутника зі штрихових ліній, що поєднують ці три точки між собою, називається колірною гамою, оскільки всі кольори всередині цієї області можуть бути отримані шляхом змішування трьох основних кольорів: червоного, зеленого та синього. Здатність відтворення якомога більшої кількості кольорів є однією з важливих

характеристик моніторів. Чим більше область кольорової гами, тим вище якість екрана.

Розглядаються два джерела світла з координатами колірності  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ . Результуючий колір розташований у точці з координатами  $(x, y)$ . На колірній діаграмі також показана трикутна область, яка називається колірною гамою. Будь-який колір із цієї області може бути отриманий при адитивному змішуванні випромінення світлодіодів червоного, зеленого та блакитного світіння. За стандартом sRGB червоний, зелений та синій кольори розташовані

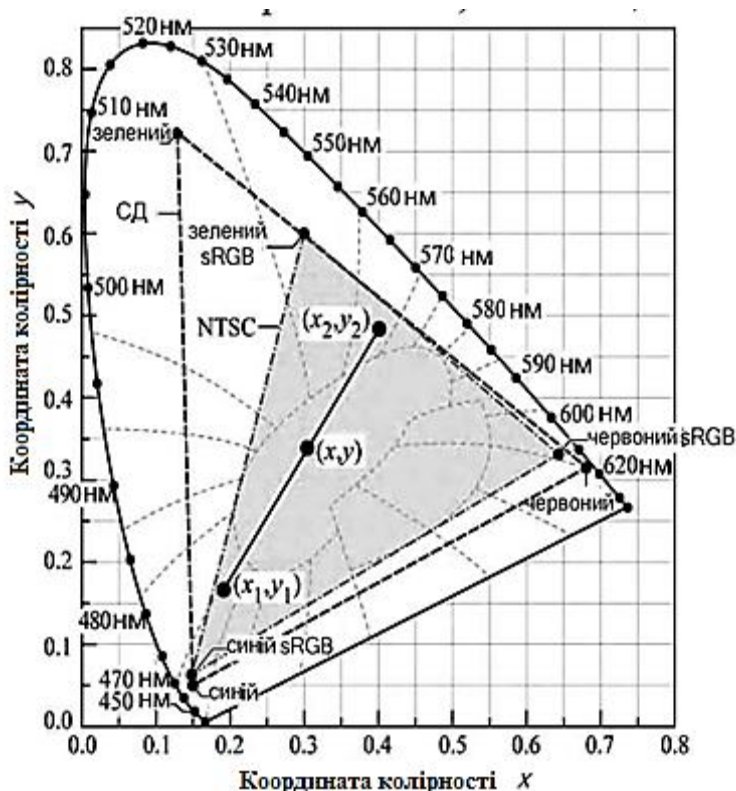


Рисунок 5.4 – Принцип змішування кольорів

основних кольорів гама, відповідають вершинам багатокутника, завжди розташовуються всередині неї. Знання того, як відбувається змішування кольорів, допомагає зрозуміти розташування різних світлодіодів на колірній діаграмі. Границя діаграми в області червоних кольорів є практично прямою лінією, тому світлодіоди червоного світіння, незважаючи на теплове розширення спектру, розташовуються на цій границі. Оскільки в області зелених кольорів діаграма має сильно виражену кривизну, світлодіоди зеленого світіння через спектральне розширення зміщуються від границі до центра діаграми.

Світлодіод, який складається із трьох кристалів – червоного, зеленого й синього, дає змогу одержати практично будь-який колір видимого діапазона оптичного спектру. Подаючи на кристал різні значення напруги, тобто

відповідно у точках із координатами колірності:  $(x_r = 0,64, y_r = 0,33)$ ,  $(x_g = 0,30, y_g = 0,60)$ ,  $(x_b = 0,15, y_b = 0,06)$ . Стандарт sRGB схожий зі стандартом NTSC.

Колірна гама становить повну сукупність кольорів, яку можна отримати з набору первинних кольорів, на колірній діаграмі вона відображається у вигляді багатокутника. У випадку трьох первинних основних кольорів гама має вигляд трикутника, що й зображено на рисунку 5.4. Всі кольори, які отримані під час адитивного змішування



пропускаючи через них різні струми, можна змінити не тільки кольори, але й відтінки того або іншого кольору.

Повнокольоровий світлодіод у найпростішому випадку виготовляється в такий спосіб. Три кристали – червоний, зелений і синій монтується на загальну основу, яка має чотири виводи. Один вивід, наприклад «+», є загальним для трьох кристалів, а три контакти, в нашому випадку «-», з'єднуються з контактами *p*-області трьох кристалів, по одному на кожний кристал (рис. 5.5).

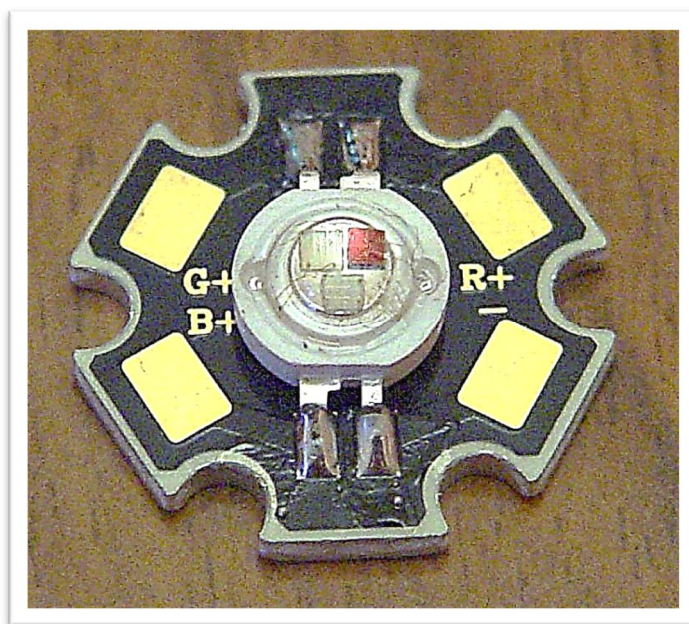


Рисунок 5.5 – Повнокольоровий світлодіод, який містить три кристали в одному корпусі

У наш час багато виробників випускають повноколірні світлодіоди з допоміжним синім кристалом, покритим люмінофором, у такий спосіб додаючи до червоного, зеленого та синього кольорам допоміжно ще й білий колір. Отже, одержується RGBW – світлодіод. Це дозволяє полегшити одержання балансу білого кольору і покращити його якість. Кожний кристал у такому світлодіоді зазвичай має незалежні контактні майданчики або виводи.

Пропускаючи різні струми через кристали, легко змінювати колір світіння такого світлодіода. Також можна одержувати за допомогою такого світлодіода і білий колір. Якщо взяти приблизне співвідношення кольорів у ТВ балансі білого кольору, який становить (відповідно до відносної інтенсивності білого кольору, рівного одиниці): червоного – 0,25, зеленого – 0,65, синього – 0,1. Підбираючи відповідні значення струмів через кристали цих трьох кольорів, можна одержати необхідне співвідношення інтенсивності їх світіння, і в такий спосіб одержати білий колір.

Такі світлодіоди використовуються в різних цілях, зокрема й у повноколірних екранах.

## 5.1 Особливості технології формування люмінофорних шарів у COB світлодіодних модулях

Взаємодія світлової енергії, що випромінюється напівпровідниковими чипами, з іншими компонентами білих світлодіодних модулів і, насамперед, із люмінофором, визначає кінцеві характеристики виробу. У цьому напрямі найбільше впливають процеси, пов'язані з перетворенням енергії синього випромінювання чипа у випромінювання люмінофора. Це перетворення здійснюється за допомогою неорганічних порошкових або спечених люмінофорних перетворювачів. Ці перетворювачі є кристалічними фото-люмінофорами, матриці яких вибирають із класів з'єднань, що мають достатню стійкість до зовнішніх впливів і стабільність в умовах роботи світлодіодного пристрою. Найпоширеніше застосування як такі люмінофори знайшли тверді розчини на основі гранатів, силікатів, оксинітридів. Хоча властивості самих матеріалів люмінофорів визначаються досить давно, варто зазначити, що ефективність перетворення в білих світлодіодних модулях визначається не характеристиками люмінофора як окремо взятого полікристалічного матеріалу, а характеристиками складу композиції, у якій люмінофор перебуває в модулі. Інакше кажуть, ефективність білого світлодіодного модуля безпосередньо залежить від характеристик люмінофорного шару, що становить затверділу люмінофорну суміш із власне люмінофора й деякої зв'язки, якою найчастіше є стабільний аморфний компаунд.

Для світлодіодів із перетворенням випромінювання за допомогою фотолюмінесценції можливі різні комбінації світлодіодних кристалів і люмінофорів для одержання білого світла. Люмінофори підбираються так, щоб їхні спектри збудження відповідали спектру випромінювання чипа. Кристал покривається шаром компаунда з порошком люмінофора в такий спосіб, щоб частина синього випромінювання збуджувала люмінофор, а частина проходила без поглинання. Цей напрямок є найпоширенішим через технологічність і економічність способу. Для розробки, дослідження й впровадження у виробництво становить інтерес процес одержання люмінофорних шарів – найактуальніший для практичного застосування в найближчому майбутньому, особливо для цілей загального освітлення. Цей процес заснований на використанні синього світлодіодного кристала як джерела збудження люмінофорів, що випромінюють жовтій і жовтогаряче – червоній областях спектра. Комбінація синього випромінювання напівпровідникового кристалу з випромінюванням люмінофорів при правильному співвідношенні між ними дає біле світло з індексом передавання кольору, прийнятним для більшості загальних застосувань. Можливий різний розподіл зерен люмінофора в шарі. В

ідеальному випадку (з погляду однорідності кольору випромінення) кристал повинен буди рівномірно покритий шаром зерен люмінофору.

Для застосування компаунда в складі люмінофорного шару важливі такі його властивості, як:

- можливість створення суміші з рівномірним розподілом люмінофора по всьому об'єму, щільність компаунда, режим сушіння (у незатверділому стані);

- стійкість до впливу тепла й випромінення, щільність суміші, показник заломлення, коефіцієнт світлопропускання (у затверділому стані).

Основна відмінність у властивостях силіконових й епоксидних компаундів полягає в тому, що стійкість перших до випромінення й тепла набагато вища. Крім того, в обсязі силіконового компаунда, завдяки його еластичності, практично не виникає небезпечна для дротових міжз'єднань механічна напруга, що підвищує стійкість конструкції в цілому. Технологія нанесення люмінофорної суміші у різних виробників світлодіодів різниться. Найпоширеніші різновиди цієї технології – автоматичне дозування люмінофорної суміші в ємність корпусу й рівномірне покриття чипа плівкою люмінофорної суміші. Суміш наноситься після установки кристалів і розварювання дротових контактів. Люмінофорна суміш має бути перемішаною з виконанням таких умов: однорідний розподіл часток люмінофора за об'ємом суміші, відсутності міхурів і сторонніх включень у суміші. Процес затвердіння люмінофорної суміші здійснюється зазвичай за режимом затвердіння компаунда.

Основними параметрами люмінофора, що впливають на ефективність світлодіода, вважаються: товщина покриття, концентрація, спектр люмінесценції, домінантна довжина хвилі, гранулометричний склад.

Для з'ясування залежності оптимальних концентрацій люмінофорів у люмінофорних шарах світлодіодних модулів від значень вище перелічених параметрів були досліджені різні варіанти концентрацій жовтих і жовто-помаранчевих та червоних люмінофорів для визначення оптимальної концентрації у світлодіодних модулях для ламп побутового застосування. Оптимальні параметри люмінофорного шару повинні забезпечити такі параметри СДМ:

- індекс передавання кольору (CRI), не менше ніж 65;
- світловіддача модулів, без врахування ККД схеми керування, не менше 80–110 лм/Вт залежно від корельованої колірної температури за ККД світлодіодних кристалів синього кольору випромінення не менше ніж 40 %;
- корельована колірна температура СДМ у діапазоні від 3 400 К до 5 600 К.



Базова конструкція СДМ визначає такі параметри фотолюмінесцентного перетворювача:

- товщина люмінофорного шару, мм –1,8;
- об'єм люмінофорної суміші в рамці СДМ, см<sup>3</sup> – 0,161;
- типи фотолюмінофорів:

1) люмінофор ZYP550SG2, компанія Nakamura Co. Ltd (Японія), жовтий порошок, розмір часток 15,0 + 1,0 мкм; область довжин збудження 450–460 мкм, довжина хвилі перевипромінення 567 нм, питома щільність 4,64 г/см<sup>3</sup>;

2) люмінофор YP630H, компанія Nakamura Co. Ltd (Японія), помаранчево-червоний порошок, розмір часток 15,0 + 1,0 мкм, область довжин збудження 450–455 мкм, довжина хвилі перевипромінення 601 нм, питома щільність 3,41 г/см<sup>3</sup>;

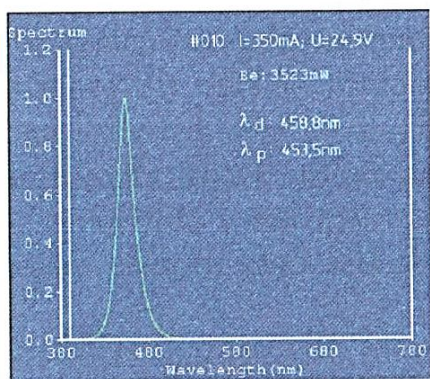
- тип світлодіодного кристала синього кольору світіння EDI-EA1734 компанії EDISON Optocorporation (Тайвань) потужністю 0,3 Вт, габаритні розміри кристала – 860 мкм × 430 мкм × 130 мкм, оптична потужність – 120 мВт;

- силіконовий двокомпонентний полімер типу EM-6637, Китай (питома щільність 1,06 г/см<sup>3</sup>).

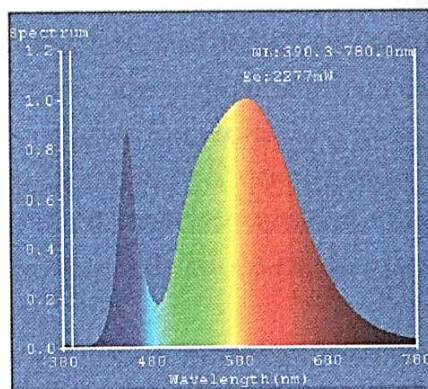
Занадто низька концентрація люмінофорів не може забезпечити одержання білого кольору, а висока може стати причиною низької світловіддачі через збільшення поглинання випромінення. Аналогічно впливає на ефективність люмінофорних шарів їхня товщина. Так, люмінофорні шари малої товщини недостатньо ефективно поглинають синьо-блакитну частину спектра. Зі свого боку занадто товсті шари недостатньо ефективно пропускають енергію випромінення синього кольору. Крім того, чим більше розмір зерна в порошках люмінофорів, тим більше інтенсивність випромінювань. Однак потрібно урахувати, що це залежність не є абсолютною, а залежить від розмірів напівпровідникових кристалів. Для однокристалівних світлодіодів із кристалами більших розмірів ефективні люмінофори з великими зернами, а для світлодіодів із кристалами малого розміру ефективний люмінофор із розмірами зерен 3–5 мкм. Проте ці залежності не повинні суттєво впливати на ефективність перетворення фотолюмінісцентних шарів у багатокристалівних світлодіодних модулях. У цьому разі ефективність СДМ більшою мірою залежить від ефекту седиментації (осідання або спливання часток дисперсної фази) у люмінофорному шарі. Усунення ефекту седиментації дає змогу значно збільшити ефективність перетворення випромінення завдяки повному опроміненню поверхонь зерен люмінофорів.

На рисунках 5.6–5.9 і в таблиці А.1 (дод. А) наведено деякі результати досліджень параметрів експериментальних світлодіодних модулів № 101, 102,

103, 104 потужністю 4 Вт, отримані при відпрацюванні МСОВ-технологій СДМ. Зважаючи на особливості конструкції СДМ і результати розрахунків параметрів люмінофорних гелів, були досліджені зразки СДМ із різними концентраціями жовтих, жовто-помаранчевий та червоних люмінофорів типів ZYP550SG2 і ZYP630H компанії Nakamura Co. Ltd (Японія). Були проведені дослідження колориметричних і світлових характеристик зразків.



а



б

Рисунок 5.6 – Спектральні характеристики світлодіодних модулів: а - до заливання люмінофором; б - після заливання люмінофором

Підтверджені оптимальні дозування люмінофорів у люмінофорних шарах завтовшки 1,8 мм у інтервалі масових співвідношень  $m_{550SG2}:m_{\text{силікона}} = 1:15, 1:30$  для жовтого люмінофора та з жовтим і червоним люмінофорами зі співвідношеннями люмінофорів між собою й силіконовим полімером  $m_{630H}:m_{550SG2}:m_{\text{силікон}} = 1:10:240$  та  $1:10:300$ .

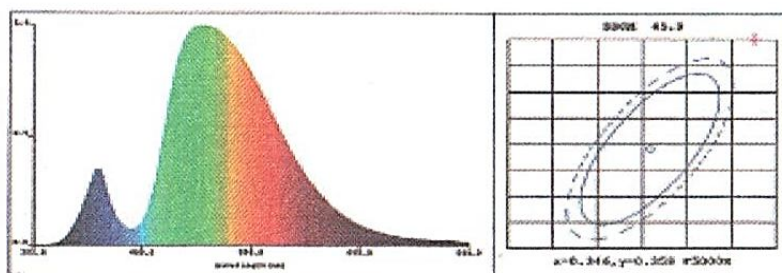


Рисунок 5.7 – Спектральні характеристики світлодіодного модуля № 101

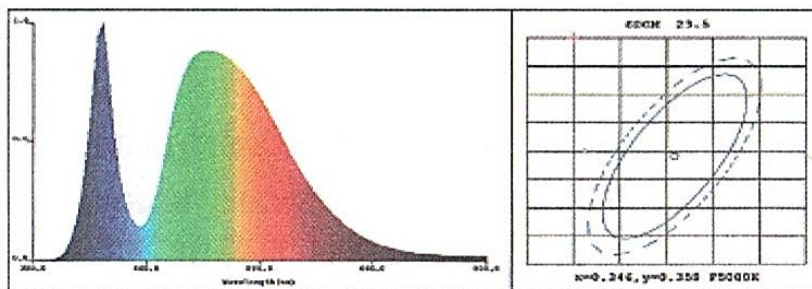


Рисунок 5.8 – Спектральні характеристики світлодіодного модуля № 102

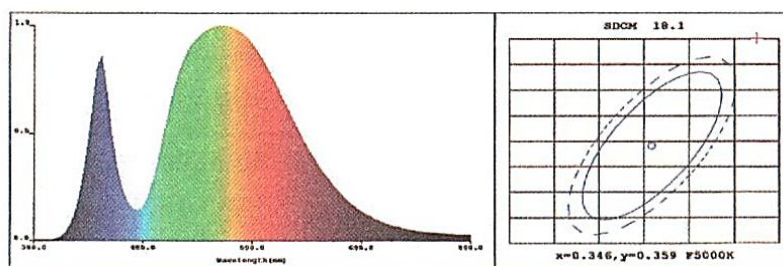


Рисунок 5.9 – Спектральні характеристики світлодіодного модуля № 103

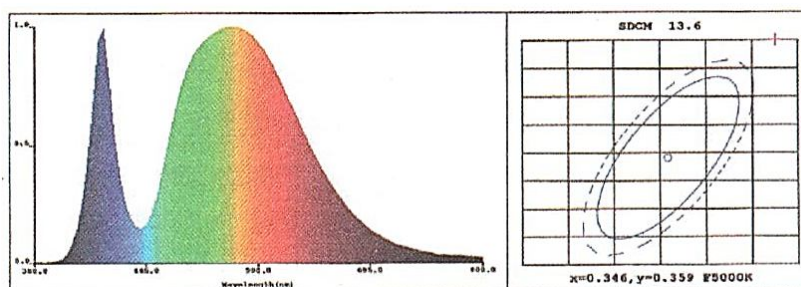


Рисунок 5.10 – Спектральні характеристики світлодіодного модуля № 104

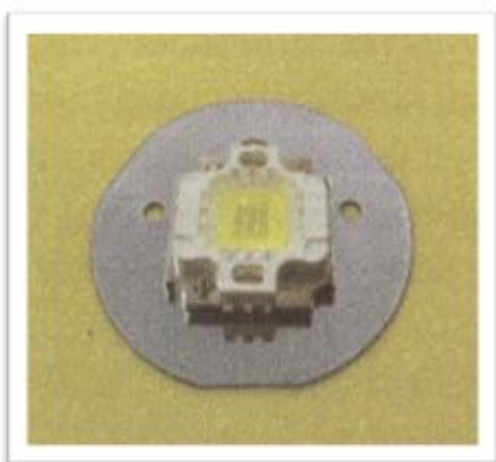


Рисунок 5.11 – Зразок багатокристалного дзеркального світлодіодного модуля

Приймально-здавальні випробування типових представників СДМ проводилися автономно на випробувальній базі ТОВ «СТУ». Перевірка й уточнення параметрів СДМ і параметрів СДМ у складі корпусів світлодіодних ламп проводилися на вимірвальній базі ХГЦСМС (м. Харків) і ІФН ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ (м. Київ). Випробування проводилися з метою дослідження впливу конструктивних і технологічних рішень на світлову ефективність і температурні характеристики дослідних зразків світлодіодних модулів, а також перевірки обґрунтованості вибору

варіантів конструктивно-технологічних рішень, матеріалів і технологічних схем виготовлення світлодіодних модулів для підвищення їхніх енергетичних і світлотехнічних характеристик. Приймально-здавальні випробування партії СДМ підтвердили їхні високі світлотехнічні параметри при робочих температурах. Світловіддача світлодіодних модулів потужністю 4 Вт та 5 Вт без урахування ККД електронної схеми керування має значення, що лежать у діапазоні від 120 лм/Вт до 130 лм/Вт для діапазону корельованої колірної температури від 4 400 К до 5 500 К, значення індексу передачі кольору лежать у діапазоні від 65,2 до 69,8.

Результатом роботи стала розробка й виготовлення компанією ТОВ «Світлодіодні технології Україна» принципово нових для України багато – кристальних світлодіодних LED LEM (Light Effective Module) світлодіодних модулів, що виготовляються за COB-технологією складання. Ця технологія забезпечила поліпшені теплові параметри плоских світлодіодних модулів для нових прототипів вітчизняних ламп із цоколем E27 різної потужності з напругою живлення від 13 В до 100 В, із робочими струмами від 50 мА до 350 мА й світловіддачею до 130 лм/Вт (рис. 5.11).

У таблиці 5.4 наведено електричні й світлові характеристики тестових світлодіодних модулів у корпусі типу LEAD FRAME 3003 встановлених на дзеркальних та матових теплопровідних алюмінієвих основах у конструкціях світлодіодних ламп конструкції 1 і конструкції 2 (рис. 5.12 ).

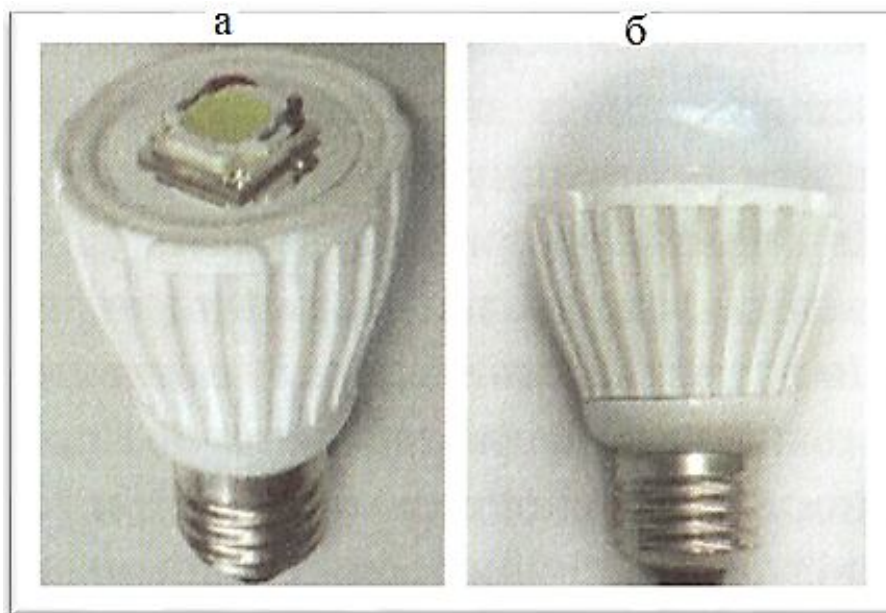


Рисунок 5.12 – Зразки світлодіодних ламп:  
а - конфігурація 1; б - конфігурація 2

Таблиця 5.4 – Електричні та світлові характеристики світлодіодних модулів в лампах конфігурації 1 та 2

Тип конфігурації	I, mA	U, V	P, W	Світловий потік, лм	Світлова ефективність, лм/Вт	ССТ, К	Ra	Збільшення світлової ефективності, %
1, матова основа	0,35	12,3	4,3	416,8	96,9	5 265	66,8	
1, дзеркальна основа	0,35	12,3	4,3	421,8	98,1	5 270	68	1,2
2, матова основа	0,35	12,3	4,3	329,2	76,6	5 053	67,2	
2, дзеркальна основа	0,35	12,3	4,3	343,2	79,8	5 050	68,6	4,2



Як впливає з таблиці 5.4, у конфігурації 2 покриття дзеркалом основи світлодіодних модулів при застосуванні високоефективних відбивачів забезпечує збільшення їхньої світлової ефективності майже на 4,2 % у складі світлодіодної лампи завдяки додатковому перевідбиттю світлового випромінення в колбі розсіювача світла. Для світлодіодної лампи без колби (конфігурація 1) це збільшення незначне, оскільки відсутня світлорозсіювальна колба і, як наслідок, немає перевідбивання від її внутрішньої поверхні.

Ґрунтуючись на отриманих результатах, був запропонований технічний розв'язок зі створення поліпшеного багатокристалного світлодіодного модуля. Сутність цього технологічного рішення полягає в тому, що кожний світлодіодний кристал у випромінювальній області модуля встановлюється тильним боком на теплопровідну дзеркальну основу. При цьому забезпечення безлічі кристалів світлодіодів плоским теплопровідним підкристалним високоефективним рефлектором зі встановленим на ньому світловідбивальним покриттям із загальним коефіцієнтом відбивання до 98 % дає змогу підвищити як оптичну, так і енергетичну ефективність світлодіодних модулів порівняно з існуючими аналогами більше ніж на 10 %.

На жаль на сьогодні немає однозначного методу вимірювання терміну служби світлодіодів. Пов'язано це з тим, що оціночні величини в 50 тис. год. відповідає 5–6 років безперервної роботи світлодіода. За цей час прогрес істотно крокує вперед і світлодіоди, для яких отримані ці дані, застарівають як морально, так і технічно, і отримані дані опиняються неактуальними.

Існує стандарт IESNA LM-80-08 [8], який визначає методику вимірювання терміну зберегти світлового потоку світлодіодів (або вимір часу деградації). Цей стандарт поширюється тільки на світлодіоди, світлодіодні матриці й модулі та встановлює стандартні умови для вимірювання часу деградації при різних умовах. У 2011 р. був опублікований технічний меморандум IESNA TM-21-11 [9], який визначає методику екстраполяції результатів вимірювань, отриманих відповідно до LM-80, за межі інтервалу вимірювань.

Отже, стандарти LM-80 і TM-21 становлять собою індустріальні стандарти для вимірювання та прогнозування терміну збереження світлового потоку світлодіодів. Для вимірювання світлового потоку готових світлодіодних систем освітлення застосовується стандарт IESNA LM-79 [10], який визначає методику й умови вимірювання спектральних, колірних енергетичних і фотометричних характеристик.

## 6 ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ

Температура  $p$ - $n$ -переходу суттєво впливає на електричні й оптичні характеристики світлодіодів. Так, підвищення температури на кожні 10 °C призводить до зменшення світлового потоку приблизно на 3–8 % (залежно від матеріала чипа) і зсуву довжини хвилі випромінення на 3 нм (рис. 6.1).

Тому питання відведення тепла від світлодіодного кристала є критичними для проектування та створення освітлювальних пристроїв на основі світлодіодів. Важливим є поняття теплового опору світлодіодів.

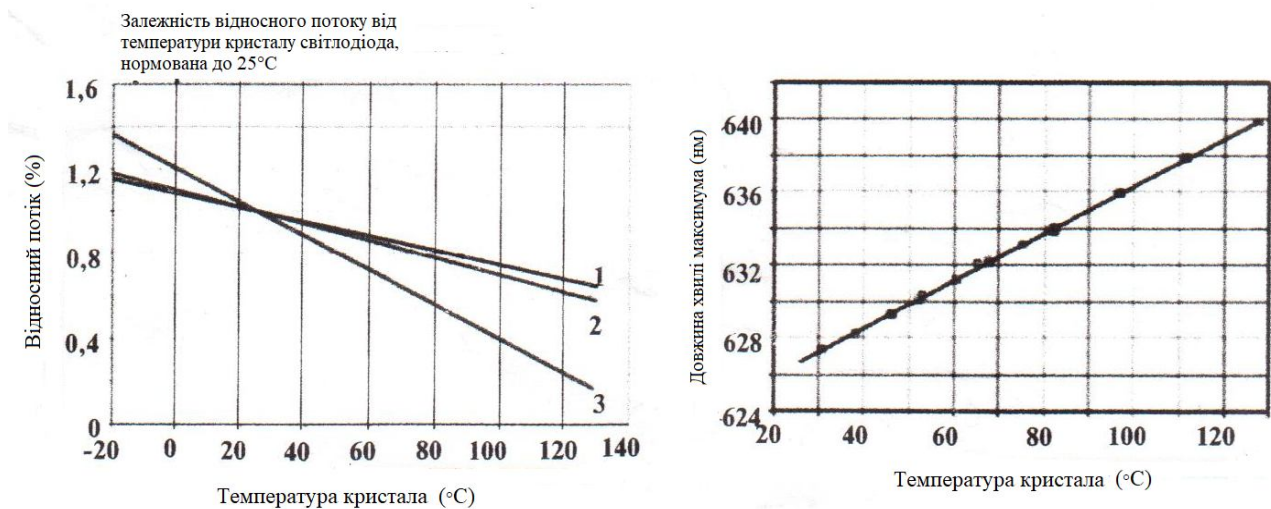


Рисунок 6.1 – Температурна залежність потоку й довжини хвилі випромінення світлодіодів: 1 – синій СД; 2 – зелений СД; 3 – червоний СД

### 6.1 Тепловий опір

Конструкція світлодіодів зі зростанням їхньої ефективності, потужності та сфери застосування удосконалювалась у напрямку покращення відводу тепла від кристала. Здатність конструкції світлодіода відводити тепло від кристала характеризується її тепловим опором і різницею температури між чипом і тепловідводною поверхнею корпусу, яка приходить на одиницю виділеної в чипі потужності (вимірюється в градусах Кельвін на Ватт (К/Вт)). У найбільш ранніх конструкціях, коли виробники не особливо піклувалися про відвод від кристала до зовнішніх частин електричних виводів становив сотні К/Вт (рис. 6.2).

Тепловий опір визначається в такий спосіб:

$$R_{\theta, j-A} = \frac{\Delta T_{j-A}}{P_{LED}}, \quad (6.1)$$

де  $\Delta T_{j-A} = T_j - T_A$  (°C),

$P_{LED}$  – теплова потужність, що виділяється в кристалі,

$T_j$  – температура кристала,  
 $T_A$  – температура навколишнього середовища.

У сучасних світлодіодах поверхневого монтажу, розрахованих для застосування в освітленні, ця величина становить всього одиниці К/Вт. Це означає, наприклад, що в одноватних світлодіодах перегрів кристала відносно тепловідвідної площини становить всього декілька градусів, що значно полегшує зусилля виробника світлодіодних систем за контролем температури  $p$ - $n$ -переходу кристала.

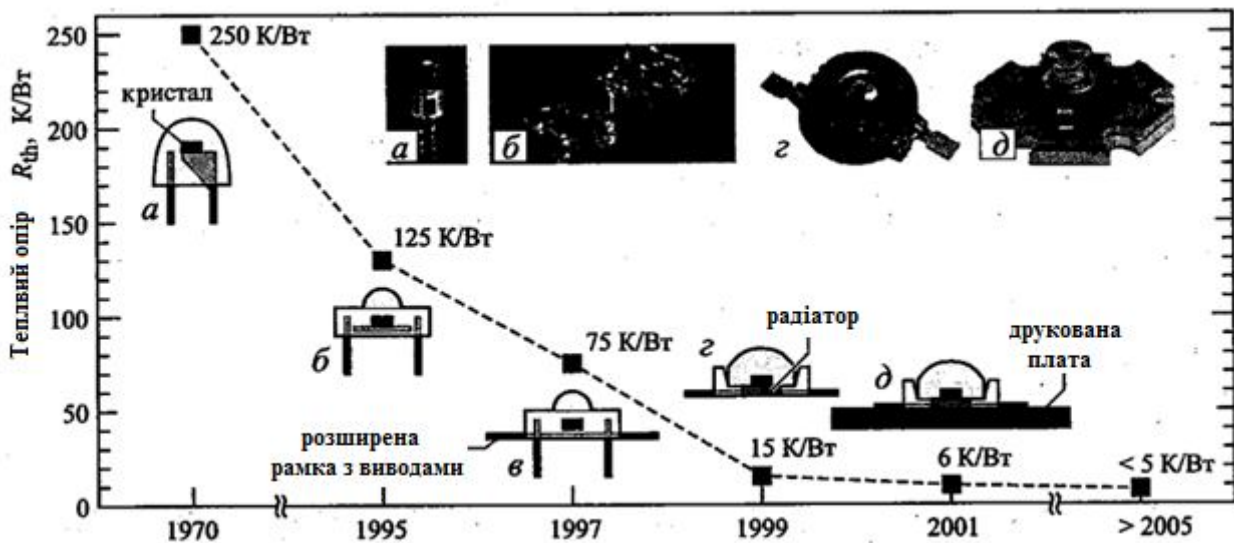


Рисунок 6.2 – Тепловий опір різних конструкцій світлодіодів із їхнім різновидом

## 6.2 Теплова модель

Загалом тепловий опір світлодіодної системи послідовно складається із декількох опорів, якими характеризуються кожна із частин на шляху «тепло від кристала» до «навколишнього середовища».

На приведеній схемі (рис.6.3), складеній із одного світлодіода, тепловий опір від кристала до навколишнього середовища складається із таких теплових опорів:

- між кристалом і тепловідвідною площадкою на корпусі світлодіода –  $R\theta_{j-c}$ ;
- між корпусом світлодіода та платою, на якій розташовані світлодіоди –  $R\theta_{c-s}$ ;
- термопровідного матеріала між платою та радіатором –  $R\theta_{TIM}$ ;
- між радіатором і навколишнім середовищем –  $R\theta_{H-A}$ .

Зазвичай, величини теплових опорів вказуються в специфікаціях на відповідні продукти або матеріали.

Сума останніх трьох величин характеризує теплові властивості світлодіодного пристрою (за винятком світлодіодів) і є об'єктом для оптимізації виробником таких пристроїв.

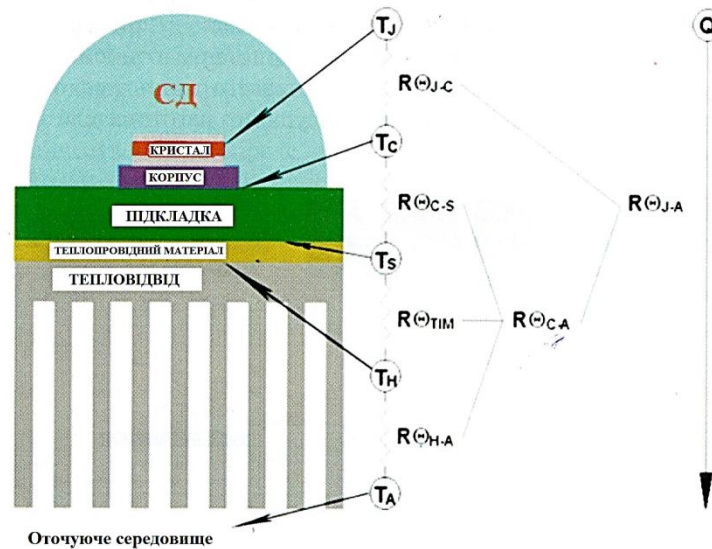


Рисунок 6.3 – Теплова модель складання із одного світлодіода

Температура кристала  $T_j$  у цьому разі визначається відповідно до (6.1):

$$T_j = T_A + (P_{LED}) \cdot (R_{\theta j-A}). \quad (6.2)$$

Схему для загального випадку багатоконпонентного складання із декількох світлодіодів наведено на рисунку 6.4.

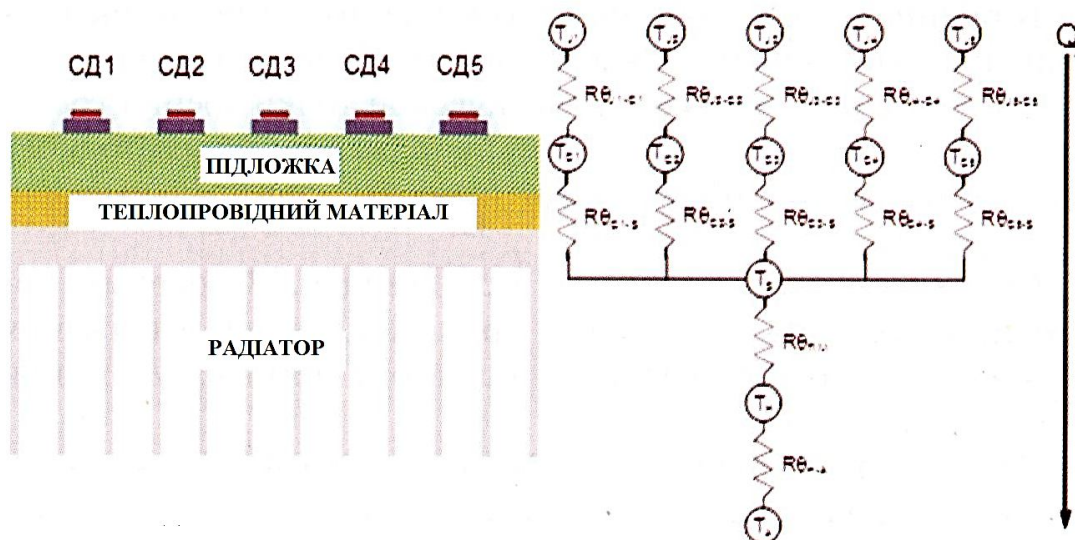


Рисунок 6.4 – Теплова модель складання із багатьох світлодіодів



У цьому разі температура корисного кристала буде визначатися відповідно до формули:

$$T_j = T_A + (P_{LEDs}) \cdot (R_{\theta j-C}), \quad (6.3)$$

де  $P_{LEDs}$  – сумарна теплова потужність, що виділяється у всіх кристалах.

Тепловий опір багатокристалального СДМ можна визначити, використовуючи моделі паралельності теплового опору, як зображено на рисунку 6.5.

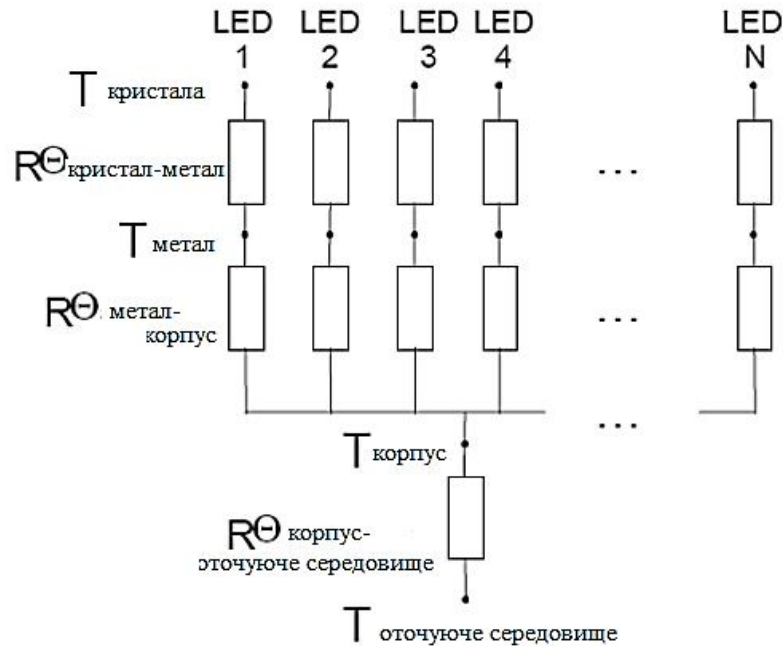


Рисунок 6.5 – Паралельна модель теплового опору багатокристалального СДМ [1]

У цій моделі кожний СД становить індивідуальний тепловий опір.  $R_{\theta,j-B}$  багатокристалального СД кластера одержують, використовуючи рівняння паралельного опору, як показано в рівнянні 6.3, а. Якщо ми вважаємо, що всі СД в кристалі є ідентичними, рівняння спрощується до вигляду 6.3, б.

$$\frac{1}{(R_{\theta,j-B})_{\text{заг.кластера}}} = \frac{1}{(R_{\theta,j-B})_{\text{СД,1}}} + \dots + \frac{1}{(R_{\theta,j-B})_{\text{СД,N}}}, \quad (6.3, \text{ а})$$

$$(R_{\theta,j-B})_{\text{заг.кластера}} = \frac{R_{\theta,j-B}}{N}. \quad (6.3, \text{ б})$$

Використовуючи моделі теплового опору, можна використовувати тепловий опір кожного компонента, температура переходу багатокристалального СД кластера може легко бути визначена. Проте проблемою моделі теплового опору є те, що вона не включає ефекти теплового переносу в складових шарах (друкованих платах) і теплових стоках які дуже важливі для теплового менеджменту СД кластерів. Хоча є декілька досліджень щодо теплового менеджменту багатокристалальних СД кластерів [22], проте в них

використовується певні конструкції та умови, так що вони не дають загальних рекомендацій для довільної конструкції кластера. Одна із рекомендованих теплових конструкцій зображена на рисунку 6.6, яка була зроблена Christensen et. al [3]. Він демонструє максимально можливу потужність на СД для різних пакувальних густин із певним тепловим стоком.

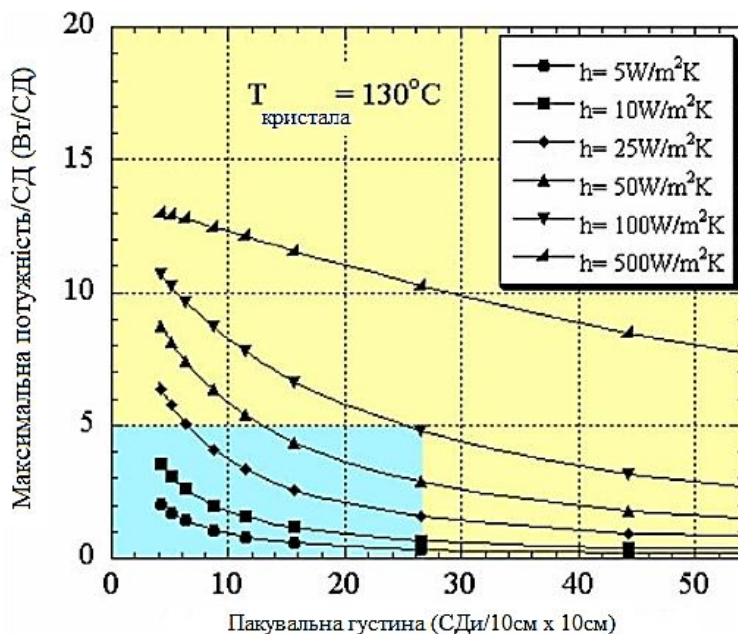


Рисунок 6.6 – Максимальна потужність розсіювання для температури переходу в  $130^{\circ}\text{C}$  для різних пакувальних густин потужних СД компонент за різних умов конвекції

### 6.3 Аналіз кінцевих елементів

Розглянемо характеристику теплової дисипації від єдиного кристала СД модуля. Одержані результати можуть бути розповсюджені на кластери. На рисунку 6.7 продемонстровано потужний СД-чип ( $>1$  Вт/корпус) із COB архітектурою.



Рисунок 6.7 – а - структура спрощеного СД модуля; б - структура IMS і DBS підложок

Уважаємо, що СД-чип є GaN і розміри є 1 мм на 1 і 4 мм товщини. Отже, ми припускаємо однорідну теплову генерацію в об'ємі чипа. Чип змонтований на кремнієвій (Si) підкладці та приєднаний із використанням евтектичної зв'язуючої, такої як Au-Si. Чип і зв'язуючий (або металізація) шар є таким тонким, що вони не моделюються. У цьому разі теплова генерація в чипі може бути заміщена однорідним тепловим потоком на верху поверхні підложки. Кремнієва підложка поміщується на електронну плату живлення, DBS або IMS і сполучена, використовуючи паяння провідників. Ця структура може бути віднесена як до єдиного-чипа СД модуля з керамічною підложкою або як частина СД кластера, яка імплементує COB архітектури (рис. 6.8). Матеріали, розміри та теплові провідності матеріалів містяться в таблиці 6.1.

Ми вважаємо, що матеріали є однорідними та ізотропним, а їхні теплові провідності не залежать від температури. Спрощена конструкція теплового стоку зображена на рисунку 6.9, який базується на LPD 19-3B Alpha Novatech Inc, який є комерційно можливий тепловий стік для природної конвекції. Спрощена модель, що використовується в цьому дослідженні, може розглядатися як єдиний чип-світлодіод або частина світлодіодних масивів, що реалізують архітектуру COB.

Припущення є справедливим, оскільки більшість тепла, що генерує СД, дисипується за провідністю. Теплове розсіяння за конвекцією навколо корпусу й підкладки є незначним, оскільки вони розміщені всередині модуля, який зазвичай вирізняється низькою тепловою провідністю.

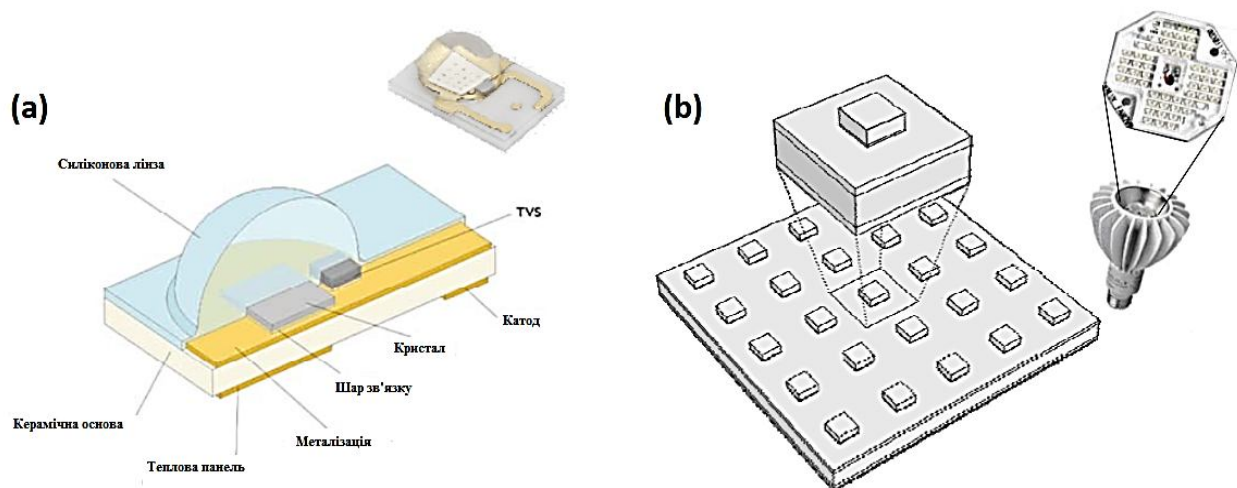


Рисунок 6.8 – Схеми світлодіодів: а – LUXEON Rebel фірми Philips Lumileds [3], що має аналогічну одиницю мікросхеми на підкладці DBC; б – схема масиву, що реалізує COB-архітектуру та світлодіодну лампу enLux Lighting [4].

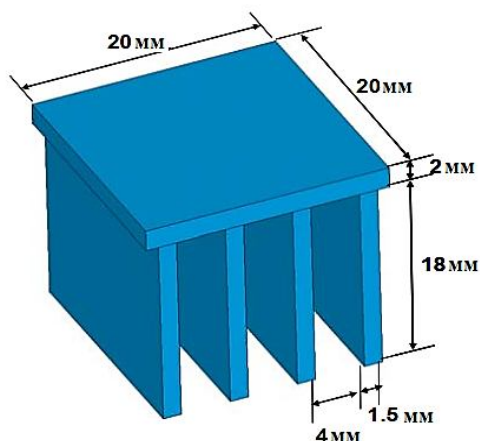


Рисунок 6.9 – Структура й розміри теплового стоку

Таблиця 6.1 – Деталі структурних розмірів і теплових провідностей за 25 °С

	Товщина	Розміри	Матеріали	Теплова провідність, (W/m <sup>2</sup> K)	
СД-чип	4 мкм	1мм × 1мм	GaN	130	
Металізація	10 мкм		Au-Si евтектичний зв'язок	27	
Корпус	375 мкм		Si	124	
Корпус-з'єднання	50 мкм		Припій без свинцю	100In	82
				Au-20Sn	57
				Sn-3.5Ag	33
Підложка	-	1 см × 1 см		Мідь	385
			DBC	AlN	180
				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30
			IMS	Діелектрик	1.1
			Al	150	
ТІМ	50 мкм		Термопаста	3	
Тепловий стік	-		Al	150	

Відомо, що загальне теплове розсіяння за провідністю в СД модулі складає більше ніж 90 %. Тепло, яке проходить через структуру СД модуля, розсіюється через тепловий стік. Ми припускаємо вільну конвекцію навколо теплового стоку й застосовуємо однорідний коефіцієнт конвективного теплового перенесення  $h = 10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ , за 25 °С температури навколишнього середовища (табл. 6.1). Теплова генерація в СД модулі може бути заміщена тепловим потоком на вершині поверхні корпусу, оскільки СД чип і шар металізації є дуже тонкими. Типовий прямий струм потужного білого СД в межах від 330 мА до 350 мА з напругою від 3,3 В до 3,4 В. Це означає, що діюча потужність є близько від 1,1 Вт до 1,2 Вт. Якщо ми припустимо, що СД має 100 лм/Вт світлову ефективність, яка є 15 % всієї ефективності, теплова генерація становитиме від 0,9 Вт до 1Вт.

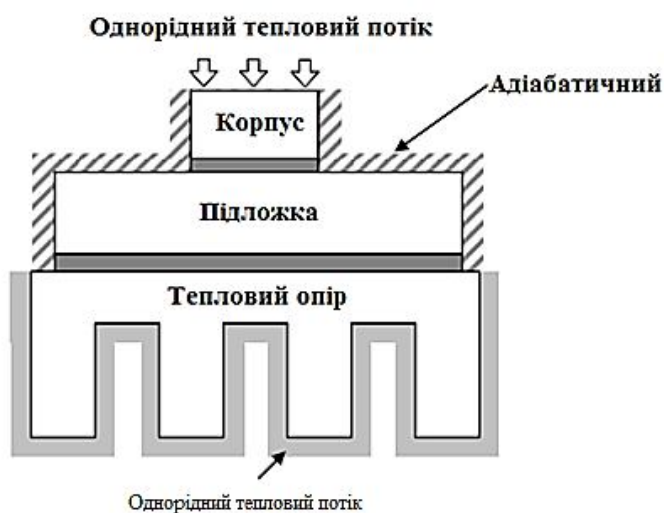


Рисунок 6.10 – Граничні умові: однорідний тепловий потік на верху корпусу, однорідна конвекція теплового перенесення навколо стоку та всіх інших поверхів

Таблиця 6.2 – Типові значення коефіцієнтів теплового перенесення конвекції

Процес	$h$ (W/m <sup>2</sup> K)
Вільна конвекція Гази Рідини	2–25 50–1 000
Вимушена конвекція Гази Рідини	25–250 100–20 000
Конвекція з фазовим переходом Кипіння або конденсація	2 500–100 000

Отже, симуляція використовуючи 1 Вт теплового потоку на вершині корпусу є послідовною з можливими світлодіодами з типовими потужностями в наш час.

Для вивчення теплових характеристик СД модуля може бути застосована ANSYS симуляція. Сітка кінцевих елементів типової конструкції продемонстрована на рисунку 6.11. Тільки ¼ задачі була змодельована завдяки симуляції. Хоча точність рішення може бути покращена, використовуючи велику кількість елементів – сіткою з малим кроком (сітка), воно обмежується пам'яттю системи й часом симуляції. Замість використання фінсїтки для повної моделі ми можемо покращити точність, використовуючи фінсїтку тільки в певних найцікавіших областях.



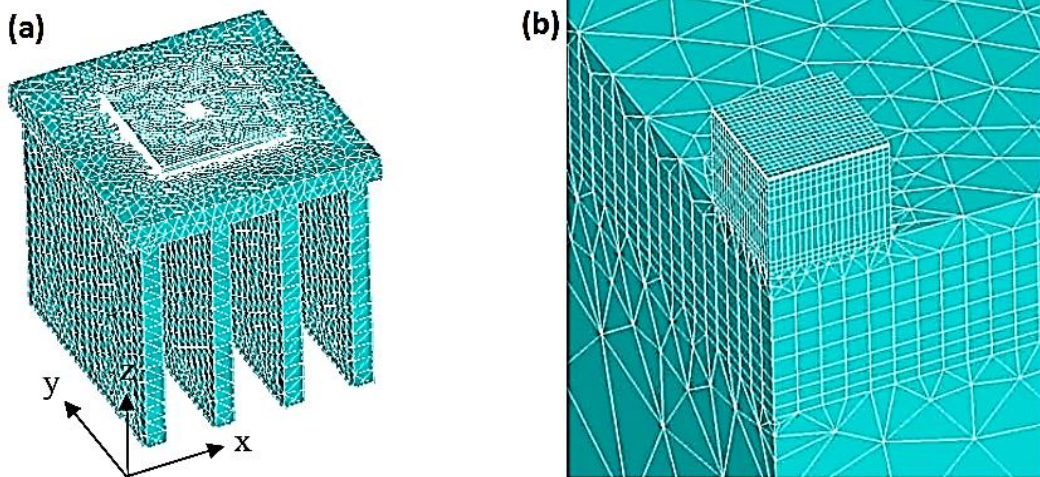


Рисунок 6.11 – Сітка кінцевих елементів: а - сітка кінцевих елементів єдиного СД модуля із тепловим стоком; б - 1/4 задачі, область, що використовується є вершиною корпусу покрита сіткою з дуже малим кроком зумовлена симетрією

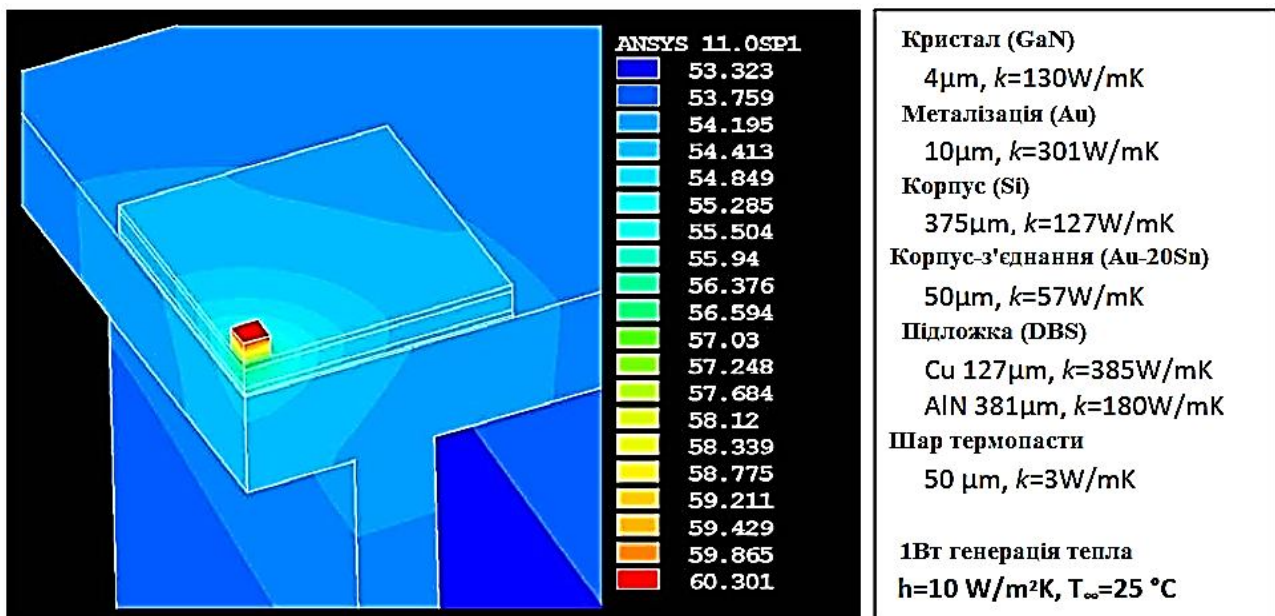


Рисунок 6.12 – Температурний розподіл СД модуля. Умовні симуляції показано на правому боці

Отже, вершина корпусу була покрита дуже мілкою сіткою, як зображено на рисунку 6.11 б. Граничні умови симетричних поверхонь є адіабатичними для теплового аналізу. Один із результатів аналізу кінцевих елементів показано на рисунку 6.12 з умовами симуляції.

#### 6.4 Вимірювання температури кристала

Перед проєктантами й виробниками світлодіодних систем дуже часто виникає питання: «Як визначити температуру кристала в світлодіоді?».

Існує декілька доволі трудоемних способів, проте найширше практичне застосування нашли метод вимірювання температури кристала за зміною його прямого падіння напруги й обчислення температури кристала із відомого теплового опору конструкції.

Як було вже відзначено, від температури світлодіодів суттєво залежить його світловий потік і довжина хвилі випромінення, проте з практичної точки зору значно простіше відслідити зміну напруги на світлодіоді (навіть у декілька мВ), ніж вимірювати спектральні або фотометричні параметри.

Суть методики полягає в такому. По-перше, необхідно одержати залежність прямого падіння напруги на кристалі в певному діапазоні температур і за певного струму.

Для цього світлодіод поміщується в термостат і після встановлення теплової рівноваги проводяться вимірювання прямого падіння напруги на світлодіоді за певного струму.

Для цього світлодіод живиться імпульсним струмом порівняно малої амплітуди  $J_{ref}$  і великої скважності (скважність – відношення періоду слідкування імпульсу до його тривалості – величина, обернена коефіцієнту заповнення) і в період дії імпульсу вимірюється прямим падінням напруги на світлодіоді.

Зазвичай, амплітуда струмових імпульсів вибирається на рівні 10–15 % від величини робочого струму світлодіодів, а коефіцієнт заповнення імпульсів – не більше 5 % (рис. 6.13).

Ці величини зумовлені з одного боку, тим, що амплітуда імпульсів і коефіцієнт заповнення повинні бути якомога менше, щоб виключити розігрівання світлодіода цими імпульсами й щоб можна було гарантувати рівність температури кристала температурі в камері.



Рисунок 6.13 – Опорні імпульси струму

З іншого боку, ці величини повинні бути достатньо великими, щоб упевнено реєструвати величину напруги в період дії імпульсу. Результатом цих

вимірювань є залежність прямого падіння напруги за опорного струму від температури кристала, наведена на рисунку 6.14.

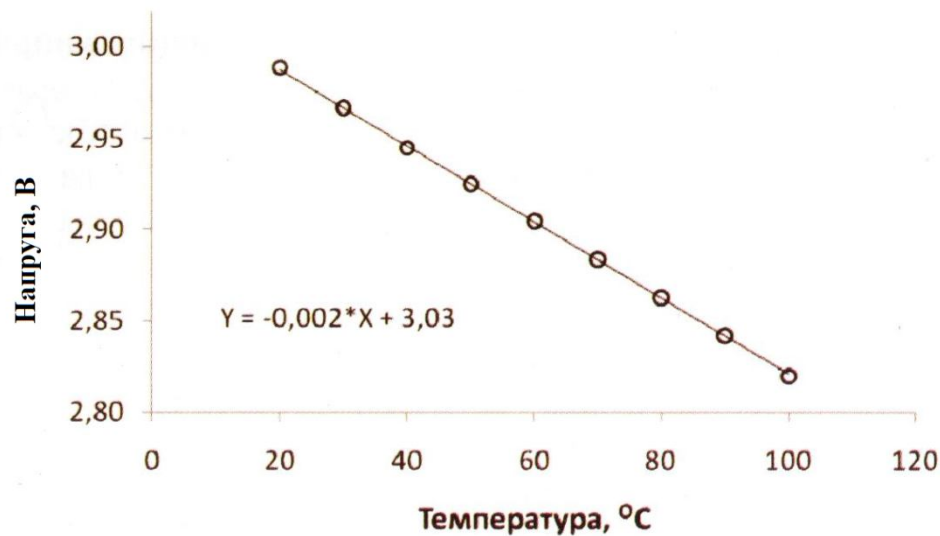


Рисунок 6.14 – Температурна залежність прямого падіння напруги на світлодіоді при фіксованому струмі

Наступним етапом вимірювання є поміщення світлодіода в реальні умови експлуатації в навколишньому середовищі та живлення його імпульсами (рис. 6.15).

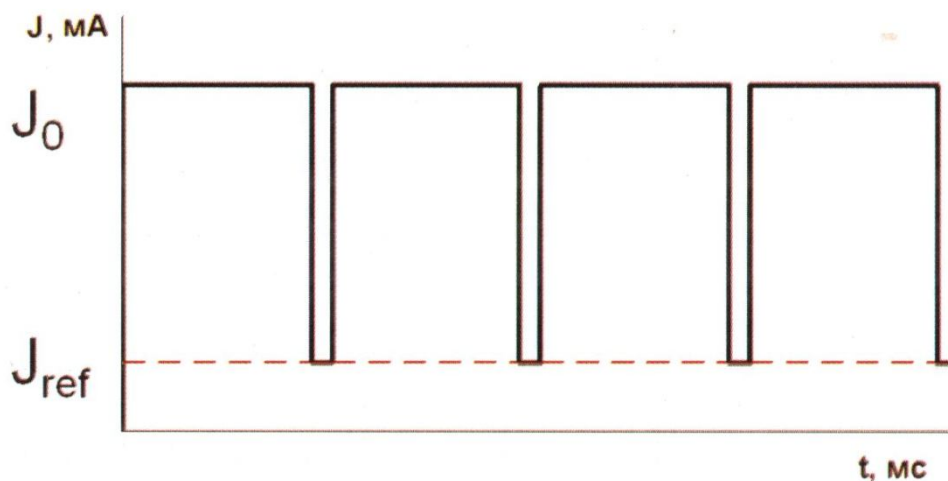


Рисунок 6.15 – Комбінація розігрівальних і опорних імпульсів струму

У цьому разі світлодіоди переважно живляться робочим струмом, і лише на короткий час включаються імпульси опорного струму, за якого спочатку проводиться вимірювання прямого падіння напруги. За цих умов світлодіод працює практично в тому самому режимі, в якому він буде працювати в готовому пристрої та температура дорівнюватиме температурі кристала в працюючому пристрої.



Включення коротких імпульсів опорного струму необхідно для вимірювання прямої напруги і, відповідно, визначення із одержаної раніше залежності (рис. 6.14) шуканої температури кристала.

### 6.5 Обчислення температури кристала за тепловим опором

Другий метод заснований на обчисленні перегріву кристала відносно деякої опорної точки в світлодіодному пристрої, температура якої виміряна за допомогою традиційних способів (термоперетворювачем або термометром) за відомого теплового опору між кристалом і цією точкою.

Фактично метод заснован на використанні відомого рівняння.

$$T_j = T_{ref} + P \cdot R\Theta_{j-ref},$$

де  $T_{ref}$  – температура опорної точки;

$R\Theta_{j-ref}$  – тепловий опір між кристалом і опорною точкою;

$P$  – тепла потужність, що виділяється в кристалі.

Зазвичай вважають, що ця потужність дорівнює добутку струму й напруги на світлодіоді, проте для точнішого розрахунку необхідно враховувати, що суттєва частина цієї потужності (до 30 %) може випромінюватись у вигляді світла.

Відповідно до теплової моделі, подано на рисунку 6.3, опорна точка може бути вибрана де завгодно, проте в процесі віддалення від кристала буде зростати й кількість складників у тепловому опорі і, відповідно, помилка визначення сумарного теплового опору.

Тому найраціональнішим рішенням буде вибрати опорну точку якомога «ближче» до кристала.

### 6.6 Проблема відводу тепла

У корпусі потужного світлодіода відведення тепла йде в зворотній бік основи. Світлодіоди зазвичай монтується на друковану плату методом лютування, при цьому забезпечується хороший тепловий контакт і основне нагрівання приходить на тильний бік друкованої плати. Її охолодження забезпечують монтажем світлодіодного модуля на тепловідвідний радіатор, як зображено на рисунку 6.16 Таким радіатором може бути корпус освітлювального пристрою.

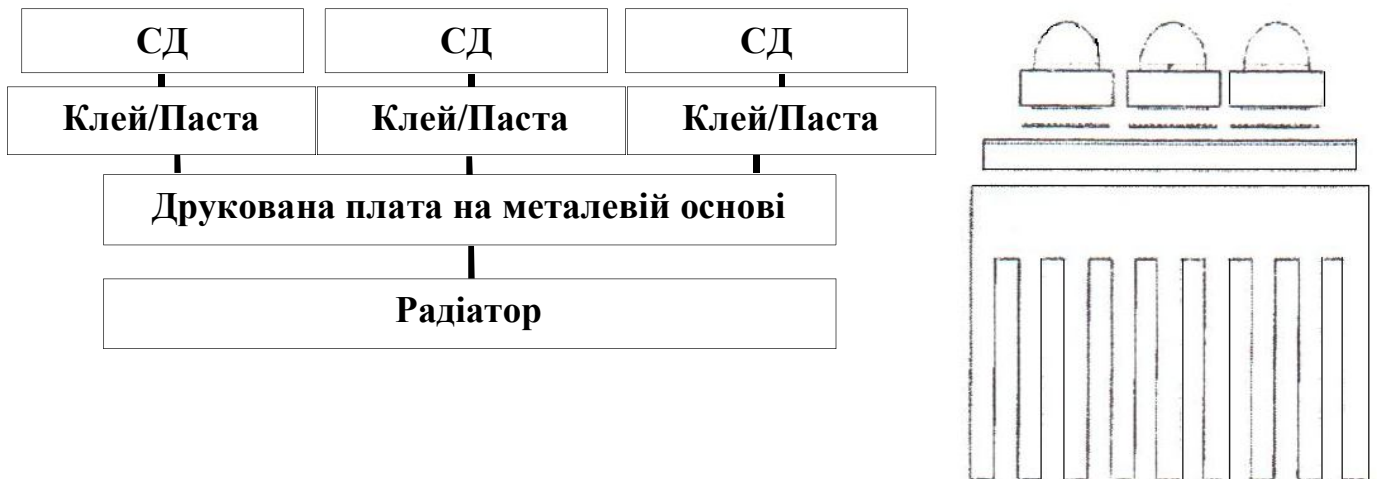


Рисунок 6.16 – Схема для теплового розрахунку світлодіодного пристрою

Проблема відведення тепла є однією із важливіших, яку необхідно враховувати під час розробки світлотехнічного виробу зі світлодіодами. Ключовим параметром є температура  $p-n$ -переходу світлодіода. Не можна допускати ситуацію, коли значення температури  $p-n$ -переходу перевищує гранично допустиме значення, що приведено в специфікації.

### 6.7 Тепловий дизайн

Ефективний тепловий дизайн не збільшує температуру конструкції СД, а зменшує температуру  $p-n$ -переходу. Для ефективного теплового дизайну важливо забезпечити теплову провідність з'єднання модуля та СД конструкцією (інакше перегрів СД). Тепловий дизайн може бути покращений, маючи неперервне теплове з'єднання СД модуля з металом СД корпусу, наприклад, використовуючи додаткову алюмінієву основу та приклеюючи СД до неї провідною самоклеючою прокладкою.

### 6.8 Внутрішній тепловий менеджмент

Теплове перенесення від  $p-n$ -переходу до СД або теплового стоку.

Теплова провідність є найефективнішим механізмом теплового перенесення. Ступінь теплової провідності залежить від матеріалів, які використовуються, і від геометрії СД. Найважливіші фактори матеріалу повинні використовуватись із низьким тепловим опором такі, як мідь і алюміній. Товщина матеріалів із малим тепловим опором повинна бути якомога тонкою. Повітря є надзвичайно поганий провідник, так що повірянні промені

повинні бути виключені, наприклад, використовуючи теплопровідну пасту або прокладку.

### 6.9 Зовнішній тепловий менеджмент

Вихід тепла від тіла СД або теплового стоку до зовнішнього середовища. Головні процеси є конвекція і теплове випромінення. Конвекція залежить від швидкості потоку зовнішнього повітря і площі поверхні, біля якої повітря може циркулювати. Теплове випромінення залежить від температури та площі поверхні СД.

Таблиця 6.3 – Аналогія електричного кола й теплової схеми

Теплова величина	Електрична величина
Абсолютний тепловий опір $R_{th}$ [К/Вт]	Електричний опір $R$ [Ом]
Різниця температур $\Delta T$ [К]	Електрична напруга $U$ [В]
Теплова провідність $\lambda$ [Вт/мК]	Електрична провідність $G$ [С/м]
Тепловий потік $\Phi$ [Вт]	Електричний струм $I$ [А]

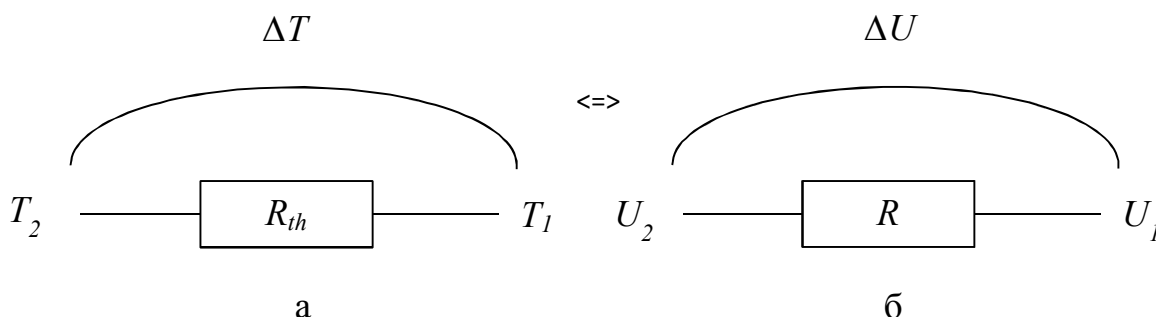


Рисунок 6.17 – а – еквівалентний тепловий ланцюг; б – еквівалентний електричний ланцюг

### 6.10 Приклад симуляційної методології

Розглянемо екструзійний алюмінієвий радіатор із гарною поверхнею, який зазвичай використовується в освітлювальних системах як тепловий стік. Він має такі розміри: діаметр 125 мм і глибина 25 мм (рис. 6.18).

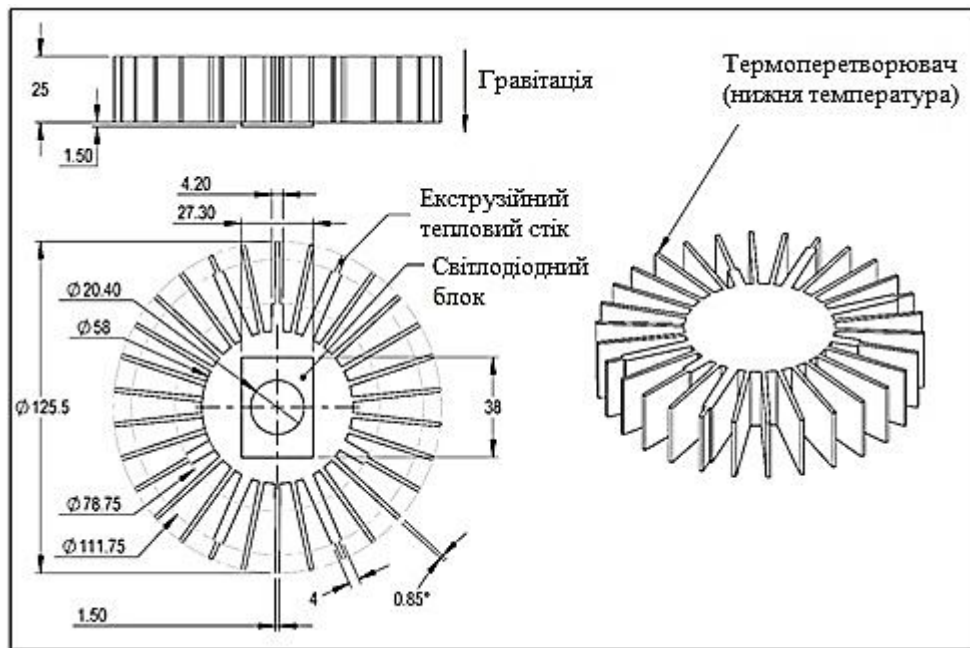


Рисунок 6.18 – Схема досліджуваного теплового стоку: екструдований радіатор зі СД пакетом

Він формується з алюмінієвого сплаву, завдяки анодизації поверхні має гарне покриття. Як теплове джерело розглядається СД модуль COB типу. Він приєднується до центру стоку. Між СД модулем і стоком поміщується підкладка із графітового матеріалу для підвищення теплового перенесення. Верхня ( $T_{high}$ ) і нижня ( $T_{low}$ ) температури вимірювались термоперетворювачами у двох точках.

Моделювання в симуляційному програмному пакеті проводилось із виключенням усіх малих (<2 мм) дірок і стрічок. Таке геометричне спрощення має нехтуючий ефект на поведінку моделі. Присутність механічних фіксаторів також має нехтуючий вплив на теплову поведінку світильника й також може бути виключено зі симуляції. Рисунок 6.19 ілюструє обчислювальну область.

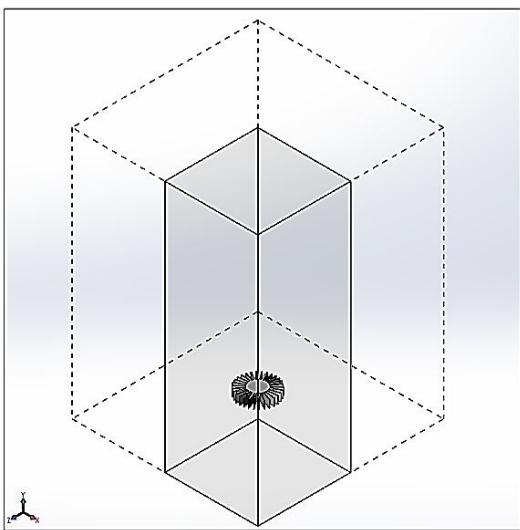


Рисунок 6.19 – Область обчислення радіатора

Вона розповсюджується на 0,3 м в  $x$  і  $z$  напрямках, і від 0,07 м до 0,755 м з діючою гравітацією – в  $y$  напрямку. Початок координат містився в центрі основи теплового стоку. Умови симетрії (границя без тертя з відсутністю потоку рідини й теплового перенесення вздовж неї) були застосовані до  $xu$  і  $zu$  площин. Область

симетрії представлена заштрихованим контуром.

Для практичного компромісу між точністю й обчислювальними ресурсами використовувалась обчислювальна сітка від 150 000 до 200 000 елементів на чверті області. Згущення сітки було сфокусовано в сферичній області в 75 мм радіуса, розташованій навколо центру теплового стоку. Зовні цього району густина елементів однорідна. Відношення вертикального до горизонтального аспекту всіх елементів сітки були приблизно 1:1. Принаймні п'ять елементів покривали внутрішній межреберний (між пластинами) простір. Обчислювальна сітка, показана для горизонтальної площини поперечного розрізу через область теплового стоку на рисунку 6.20, є некомформною Декартової системи.

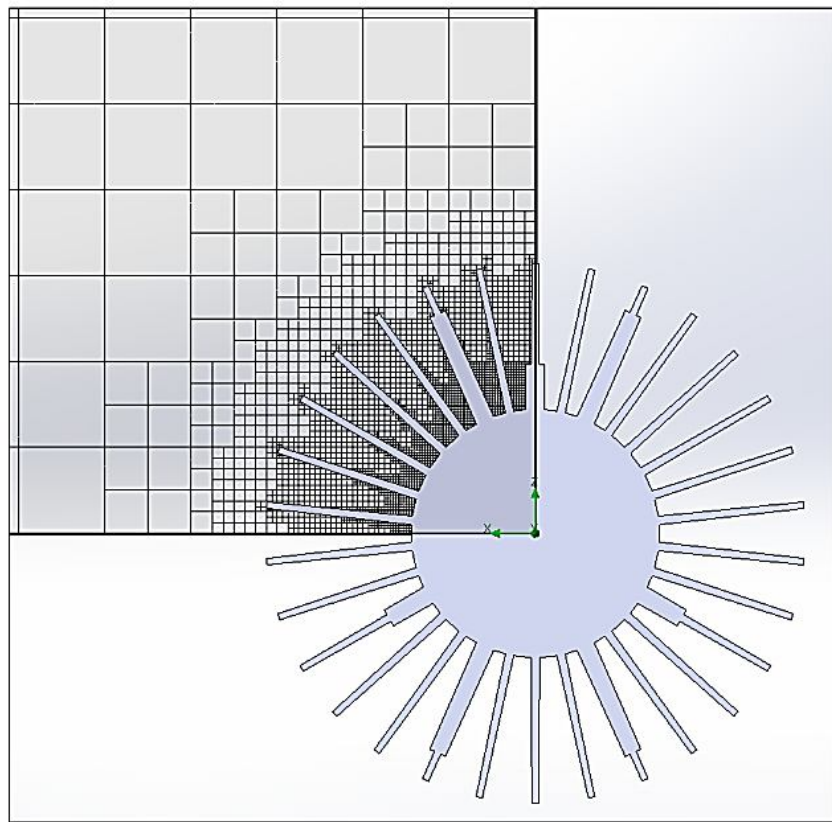


Рисунок 6.20 – Локальна сітка навколо теплового стоку

Мінімальна та максимальна температури теплового стоку використовуються для визначення збіжності. Критерій збіжності був визначений автоматично CFD (Computational Fluid Dynamics) пакетом, проте тільки приходить через ефект одного симуляційного проходу (фактор розповсюдження кожної із граничних умов у всіх відношеннях повної обчислювальної області). Це відбувається після приблизно 100 ітераційних кроків.

Убудована програмна модель описувала поведінку повітря в стандартних атмосферних умовах і початковій температурі 298,15 К.

Як відмічається в літературних оглядах, радіаційне теплове перенесення може становити до 40 % повного теплового перенесення від системи [48]. Отже, є необхідність включення цих коефіцієнтів. Радіаційне теплове перенесення моделювання, використовуючи модель зіткнення променів стінка-стінка, яка використовує процедуру трасування променів для визначення пропорції енергії, яка переноситься в кожному напрямку. Розділення радіаційного фактора поля зору (число променів, які трасуються для поля зору фактора обчислень) було встановлено як 5. Навколишнє середовище, щодо якого переноситься радіаційний тепловий потік від світильника, було специфіковане як 298,15 К. Теплова провідність оцінювалась за властивостями алюмінієвого сплаву як 171 Вт/м<sup>2</sup>К [49]. Коефіцієнт випромінення поверхні теплового стоку приймався 0,7 (оцінювався на основі значень запропонованих Fluke Corporation [50]).

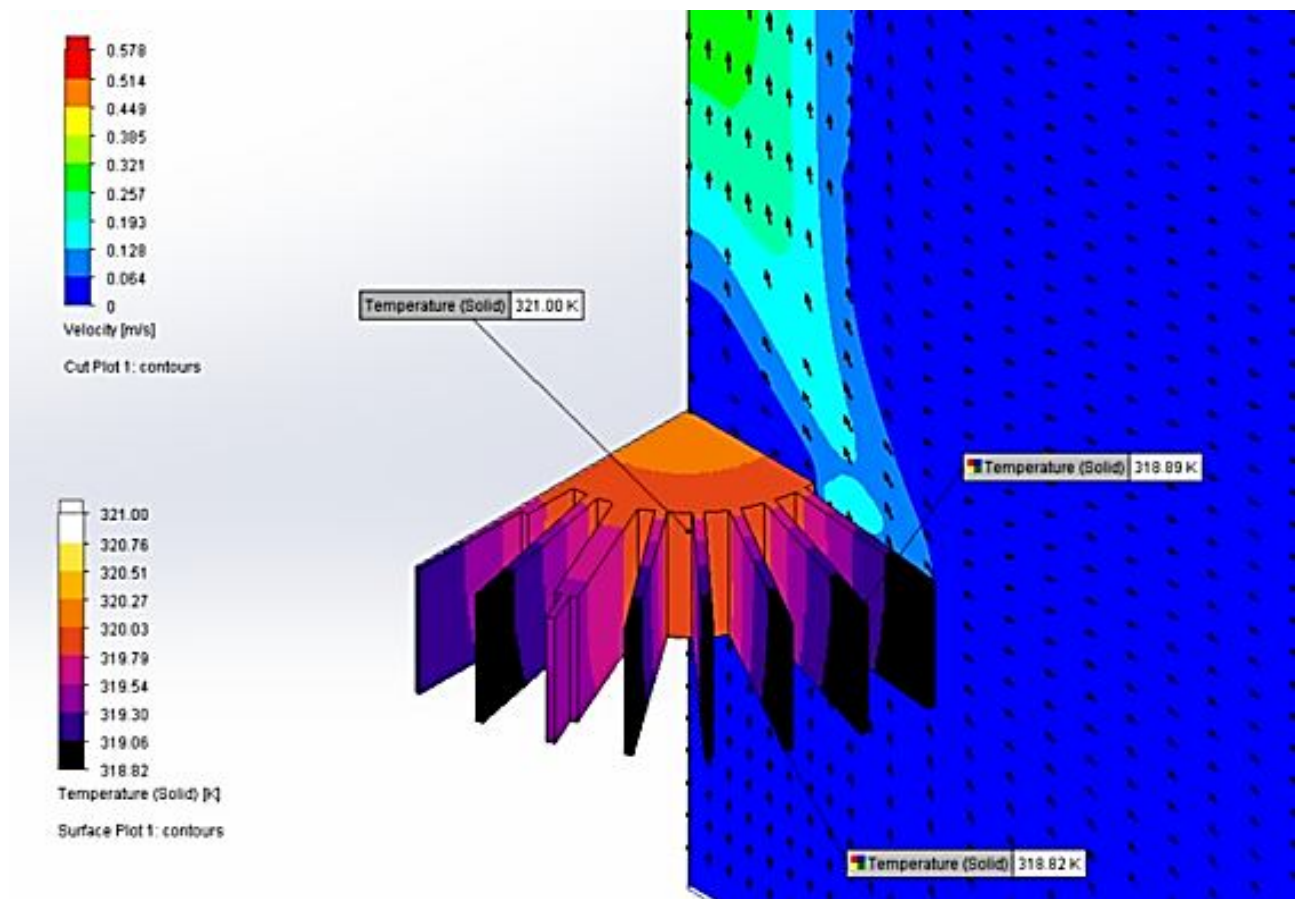


Рисунок 6.21 – Симульований тепловий потік та температурний профіль теплового стоку

Теплове навантаження було оцінено в 3,15 Вт на тепловий стік, базуючись на специфікації СД компонента (Philips [51]). Уважалось, що теплове джерело було однорідно розподілено вздовж повної області контакту між тепловим стоком і СД компонентом. Попереднє вивчення показує, що



теплове перенесення від тіла СД компонента щодо навколишнього середовища є незначним. Відповідно, площа поверхні СД модуля становить 2 % повної площі поверхні моделі, тому можна виключити симуляцію. Радіаційне теплове перенесення неможливе, де поверхня теплового стоку затемнена тілом СД компонента.

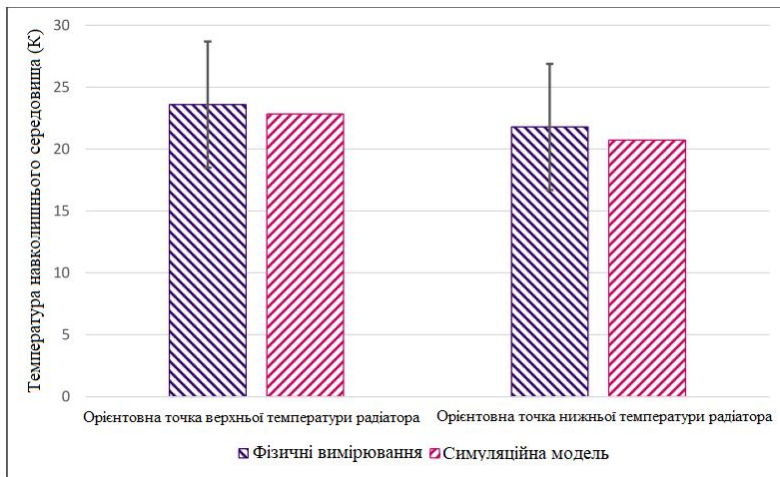


Рисунок 6.22 – Порівняння симульованих і вимірних температур

теплового стоку верхньої ( $T_{high}$ ) і нижньої ( $T_{low}$ ) референсних точок відносно температури навколишнього середовища.

Типовий результат моделювання продемонстровано на рисунку 6.21, на якому зображені швидкості потоку рідини, температура поверхні радіатора й конкретні контрольні температури.

Тепловий опір був обчислений із записаних температур і відмічений у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Обчислені теплові опори

Межі оцінки	Тепловий опір		Різниця*
	Вимірний	Симульований	
Верхня температура теплового стоку ( $T_{high}$ ) і температура навколишнього середовища ( $T_{amb}$ )	1,873	1,813	-3 %
*Різниця між вимірними й симульованим значенням, вираженим у відсотках виміряного значення.			

Вимірні температури компонента теплового стоку були точно відтворені з використанням оцінених параметрів симуляції. Тепловий опір також показує точне узгодження між симуляцією та вимірюванням (для цього дослідження визначається як найбільше 0,1 К/Вт або  $\pm 10$  % різниці). Невелика різниця між

верхньою ( $T_{high}$ ) і нижньою ( $T_{low}$ ) референсними точками, порівняно з великою різницею між нижньою ( $T_{low}$ ) референсною точкою та навколишнього середовища, демонструє, що взаємодіє системи з навколишнім середовищем найбільше впливає на його повні характеристики теплового менеджменту. Точність цієї симуляції підкреслює правильність вибраних граничних умов, припущення та спрощення були дійсні. Для порівняння, другий аналіз був проведений, за якого ефекти радіаційного теплового перенесення були заблоковані. Результуючі верхня й нижня температури ( $T_{high}$  і  $T_{low}$ ) теплового стоку були 28,1 і 26,0 К вище температури навколишнього середовища. Хоча ці симуляційні температури були всередині границі вимірювальної невизначеності, вони були наближені до надзвичайної границі діапазона й розглядалися менш вірогідними бути точними. Відповідний тепловий опір спираючись на ці температури був 2,229 К/Вт (що відповідає похибці виміряного значення 19 %). Це було поза діапазоном, визначеного як прийнятний. Як приблизні значення оцінювання вкладу радіаційного теплового перенесення до загальної теплової розсіяної потужності, для теплової простої системи для якої кондуктивне теплове перенесення може значною мірою бути проігноровано, радіаційне й конвективне теплове перенесення може бути розглянуто двома визначеннями паралельними модами теплового перенесення від системи. Опір до теплового перенесення цими двома модами може тоді бути оцінено з використанням встановлених принципів паралельного опору, який описується співвідношенням:

$$\frac{1}{R_{\theta}} = \frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_c} \quad (6.4)$$

де  $R_{\theta}$  – повний тепловий опір теплового стоку;

$R_r$  – тепловий опір, радіаційного теплового перенесення;

$R_c$  – тепловий опір конвективного теплового перенесення.



## 7 ЕЛЕКТРИЧНІ ЛАНЦЮЖКИ СВІТЛОДІОДІВ

Існує кілька типів електронних сполучень світлодіодів у ланцюжки, кожний із яких має свої переваги та недоліки. Оскільки режим роботи світлодіодів визначається величиною протікаючого струму, то найраціональнішим і найчастіше використовуваним, є їх послідовне з'єднання в електричні ланцюги.

За такого сполучення анод (+) одного світлодіода підключається до катоду (-) наступного, а весь ланцюжок світлодіодів підключається до джерела живлення відповідно до полярності його крайніх виводів. Отже, через усі елементи в ланцюжку послідовно сполучених світлодіодів протікає один і той самий струм, рівний струму, що генерує джерело живлення.

На рисунку 7.1 подано типову схему, коли до джерела постійної напруги підключаються ланцюжок із послідовно сполучених світлодіодів і струмообмежувального резистора.

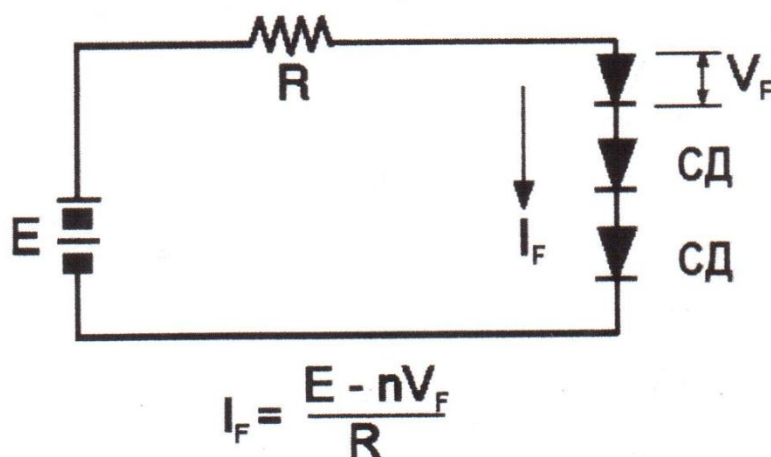


Рисунок 7.1 – Послідовне з'єднання світлодіодів

Ця схема є не найвдалішою, оскільки за живлення світлодіодів від джерела постійної напруги невеликі відхилення в прямому падінні напруги на світлодіодах або на виході джерела живлення призводить до значних змін струму в ланцюгу. Тому необхідно використовувати додатний (баластний) опір для надання лінійності вольт-амперної характеристики (далі – ВАХ) навантаження. Цей допоміжний опір повинен бути, з одного боку, достатньо великим, щоб компенсувати нелінійну залежність ВАХ і температурну залежність падіння напруги на світлодіодах, а з іншого боку – достатньо малим, щоб мінімізувати баластні втрати. Струм, який протікає в ланцюгу, буде дорівнювати відношенню різниці напруги джерела живлення й сумарного падіння напруги на світлодіоді до величини баластного опору.

Характерною особливістю такого сполучення є те, що падіння напруги на всьому ланцюжку світлодіодів і інших елементів, сполучених із ними послідовно (наприклад резистор  $R$  на рис. 7.1), дорівнює вихідній напрузі джерела живлення. Це відкриває шлях до створення так званих «високовольтних світлодіодів» (High-Voltage LEDs), які можуть мати живлення від мережевої напруги 110-220 В. Подібні світлодіоди (в дійсності це модулі, нехай зовнішньо й схожі на звичайні світлодіоди) виробляються такими компаніями, як Seoul Semiconductor, Epistar, Philips LumiLeds, Everlight тощо. Приклад електричної схеми високовольтного світлодіода наведено на рисунку 7.2.

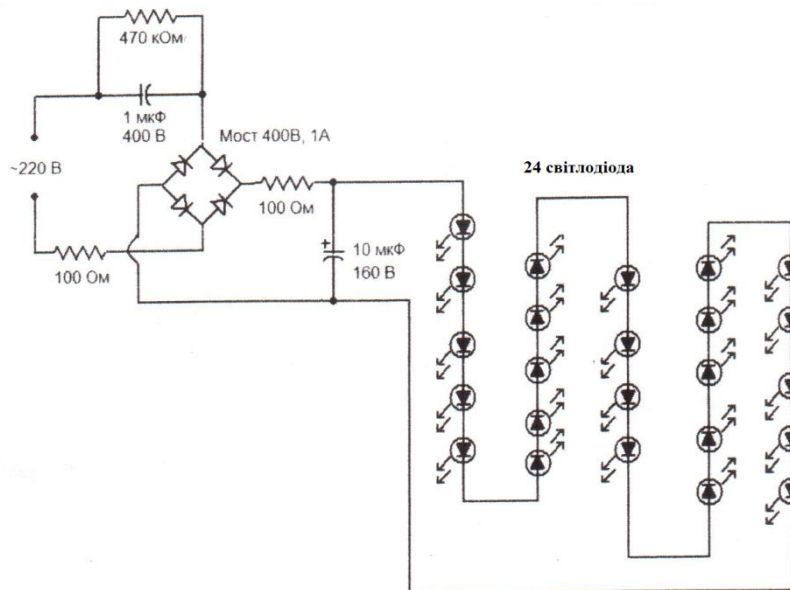


Рисунок 7.2 – Електрична схема живлення світлодіодного модуля від мережевої напруги

Істотним недоліком послідовного сполучення є проблема надійності, спричинена відмовою одного зі світлодіодів. У цьому разі (якщо хоча б один СД у ланцюжку послідовно з'єднаних виходить із ладу) в ланцюгу утворюється обрив і струм перестає текти через весь ланцюг. Цього недоліку немає у паралельному з'єднанні СД (рис. 7.3).

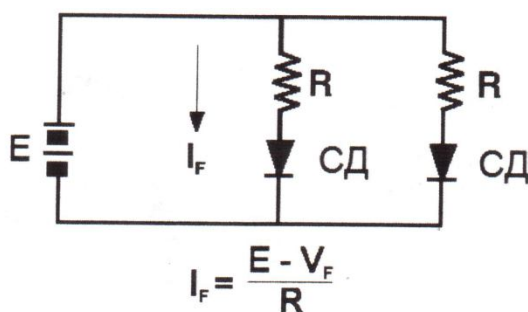


Рисунок 7.3 – Паралельне з'єднання світлодіодів

За паралельного з'єднання аноди й катоди всіх світлодіодів з'єднуються, відповідно, до позитивного та від'ємного виводів джерела живлення (також можливо використання струмообмежувальних резисторів – по одному на кожний світлодіод). У цьому разі струм, який протікає у всьому ланцюгу, дорівнює сумі струмів через кожний із СД, і за виходу одного із світлодіодів із ладу інші продовжуватимуть функціонувати.

Недоліками такого з'єднання є підвищені втрати внаслідок використання більшої кількості баластних резисторів, а також необхідності використання низьковольтних джерел живлення (4–5 В) за умови забезпечення порівняння великого струму.

Послідовно-паралельне з'єднання (рис. 7.4) поєднує в особі переваги обох видів з'єднань і частково дозволяє позбутися їхніх недоліків.

Варіацією послідовно-паралельного з'єднання є з'єднання із вирівнювальними зв'язками, які є найстійкішими із точки зору виходу одиничного світлодіода із ладу та застосовується в більшості світлодіодних модулів, складених із множини кристалів малої потужності. Приклад використання такого з'єднання в світлодіодах наведений на рисунку 7.5.

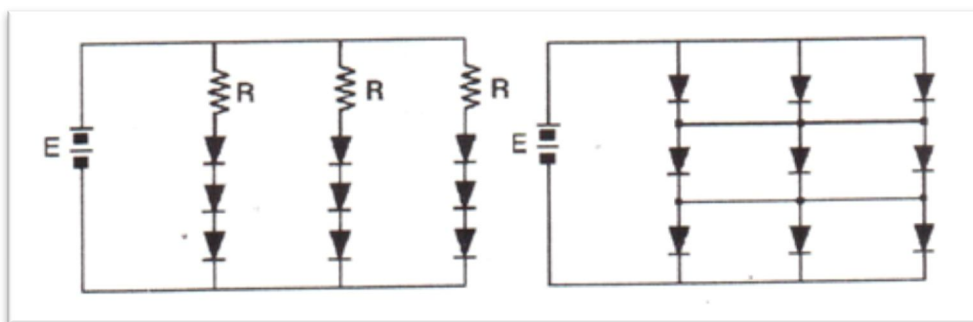


Рисунок 7.4 – Послідовно-паралельне з'єднання світлодіодів і з'єднання з вирівнювальними зв'язками

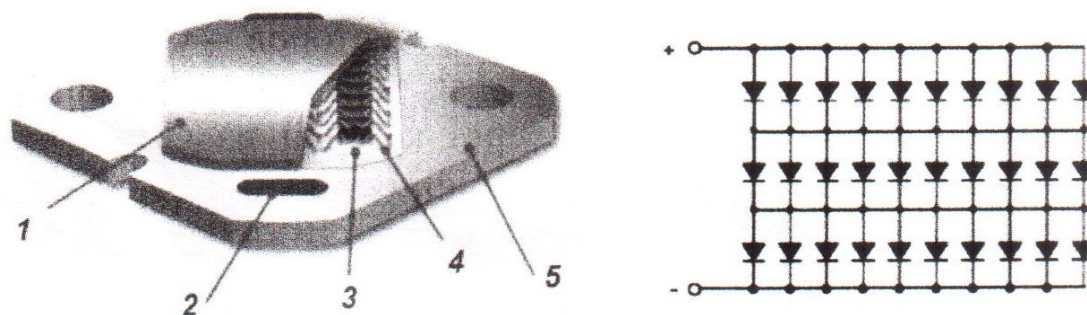


Рисунок 7.5 – Модуль з паралельно-послідовним з'єднанням світлодіодів з вирівнювальними зв'язками: 1 – люмінофорний шар; 2 – площина для паяння; 3 – СД-кристал; 4 – золотий електрод; 5 – керамічна підкладка.

## 7.1 Живлення ланцюжків

Із точки зору практичного виготовлення освітлювальних пристроїв на основі потужних світлодіодів найдоцільнішим є використання послідовного з'єднання світлодіодів і живлення їх від джерела постійного струму. Типова схема застосування наведена на рисунку 7.6.

У цьому прикладі до вихідного джерела живлення, розрахованого на струм 350 мА, підключається ланцюжок із послідовно з'єднаних світлодіодів, кожен із яких живиться, відповідно, одним і тим самим струмом 350 мА.

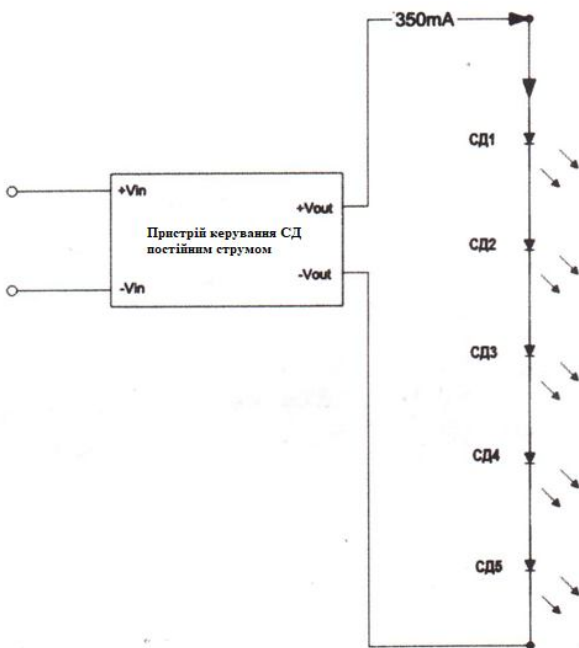


Рисунок 7.6 – Схема живлення ланцюжка послідовно з'єднаних світлодіодів

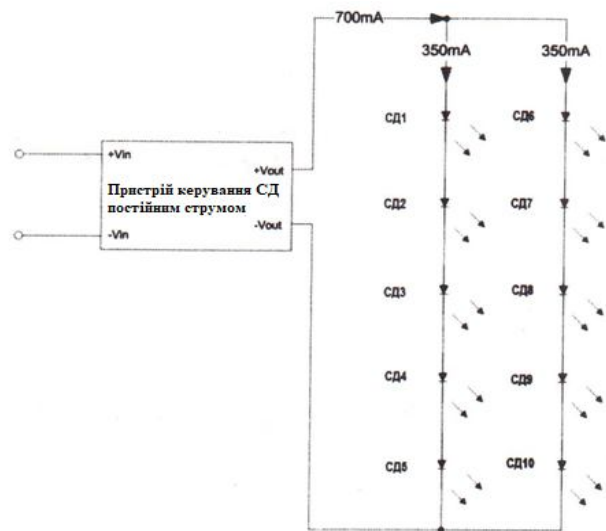


Рисунок 7.7 – Схема паралельного підключення двох послідовних ланцюжків до одного джерела

З метою економії, однак, часто виникає спокуса використовувати джерело живлення, розраховане на більший струм, і підключати до його виходу декілька паралельних ланцюжків із надією на те, що струм розділиться між ними порівну. Наприклад, використати джерело на 700 мА і підключити два ланцюжки (рис. 7.7). У цьому разі очікуване рівномірне розділення струму – дуже рідкісна ситуація. У дійсності відбувається істотний перерозподіл струму, усунути який навіть за допомогою струмообмежувальних резисторів дуже важко (рис. 7.8).

Пов'язано це насамперед із тим, що з самого початку всі світлодіоди мають деякий розкид у прямому падінні напруги на них, і завдяки сильній нелінійності ВАХ світлодіодів це призводить до перерозподілу струму між ланцюжками.

Крім того, світлодіоди в ланцюжку, через який тече великий струм, будуть більше нагріватися, і оскільки напруга на світлодіоді падає з їх перегрівом, через них буде йти ще більший струм, тоді як у другому ланцюжку ситуація буде прямо протилежна, що ще більше ускладнить положення.

Позбавитися від цього може використання так званого «струмового дзеркала» – доволі простої електронної схеми на основі біполярних транзисторів, яка дає змогу розділити струм у зовнішньому ланцюгу порівну між окремими світлодіодами ланцюжками (рисунок 7.9).

Важливо, щоб транзистори працювали за однакової температури (були термічно пов'язані) і були узгоджені за напругою зміщення база-емітер.

Іншим рішенням цієї проблеми є використання пристрою керування послідовного струму з декількома вихідними каналами, до кожного із яких підключається один ланцюжок послідовно з'єднаних світлодіодів.

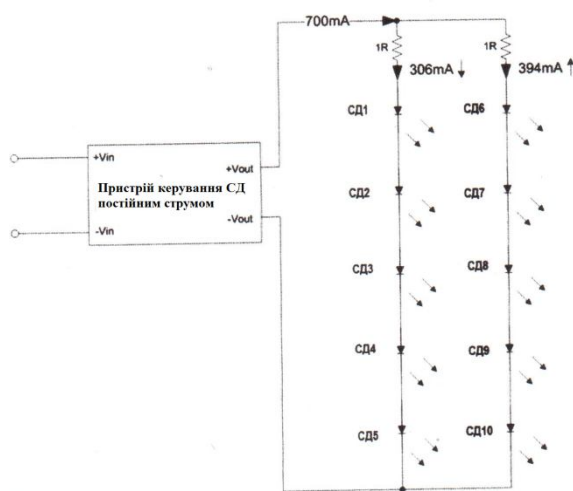


Рисунок 7.8 – Схема паралельного підключення двох послідовних ланцюжків до одного джерела струму

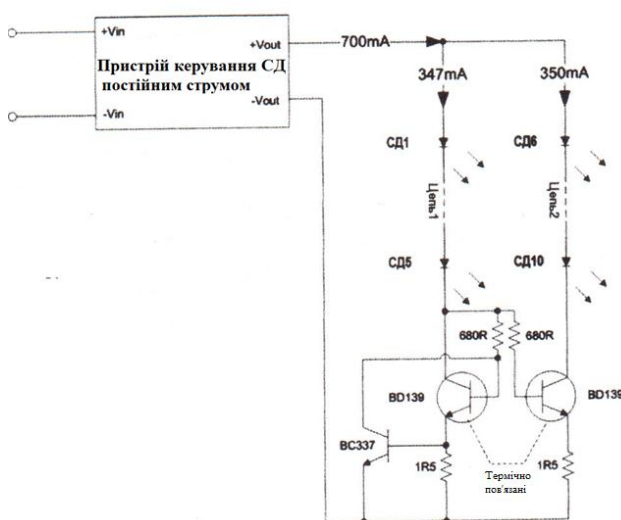


Рисунок 7.9 – Використання «струмового дзеркала» для рівномірного розділу струму між ланцюжками



## 7.2 Світлодіодні пристрої керування

Світлодіодні пристрої керування (далі – ПК) (рис. 7.10) – це джерела постійного стабілізованого струму, призначеного для живлення світлодіодів у широкому діапазоні температур. Головна відмінність ПК від традиційних джерел живлення полягає в тому, що на виході живлення в зовнішньому ланцюгу встановлюється певне значення струму (в певному діапазоні напруг).



Рисунок 7.10 – Приклади різного виконання ПК

Пристрої керування можуть мати різноманітні конструктивні виконання та призначатися для роботи в різних кліматичних умовах. Вони характеризуються переважно такими параметрами.

1. Струм стабілізації та точність стабілізації. Рівень вихідного струму для живлення потужних світлодіодів, зазвичай, вибирається із ряду 150, 200, 350, 500, 760 і 1 000 мА. Точність стабілізації струму для значної більшості практичних застосувань достатня на рівні  $\pm 5\%$ .

2. Вихідна потужність – сумарна вихідна потужність, що генерує ПК. Залежність від вихідного струму, максимальної вихідної напруги й кількості вихідних каналів.

3. ККД – відношення вихідної потужності до вхідної. Характеризує ефективність ПК та впливає на кінцеву енергетичну ефективність світлодіодного світильника.

4. Кількість вихідних каналів. ПК можуть мати декілька вихідних каналів із різними або однаковими значеннями вихідного струму. Канали можуть призначатися для живлення світлодіодів різного кольору світіння.

5. Діапазон вхідних напруг – діапазон напруг живлення ПК (зазвичай, 110 або 220 В).

6. Діапазон вихідних напруг – визначає мінімальну й максимальну кількість послідовно з'єднаних світлодіодів, які можуть бути живлені від ПК. Максимальна кількість послідовно з'єднаних світлодіодів, які можуть бути підключені до ПК, розраховується як відношення максимальної вихідної напруги до типового значення прямої напруги світлодіодів заданого значення струму. У разі перевищення цієї кількості струм у вихідному ланцюжку може мати меншу величину й бути нестабілізованим. Крім того, максимальна вихідна напруга сумісно з вихідним струмом визначає вихідну потужність ПК.

7. Захист від перевантажень і аварійні режими. Для захисту ПК від короткого замкнення на виході, зазвичай, передбачаються різні аварійні режими. Найрозповсюдженіше використання «гикаючого» режиму (hiccup mode). Цей режим активується в тому разі, якщо пряме падіння напруги на навантаженні ПК менше нижньої границі допустимого діапазону вихідних напруг (підключено надто мало світлодіодів, що еквівалентно короткому замиканню). У цьому режимі на вихід періодично подається напруга доти, доки не буде зняте коротке замикання (візуально це виражається в тому, що світлодіоди починають мигтати).

8. Регулювання яскравості (аналогова, широтно-імпульсна модуляція) можливість керування яскравістю підключених світлодіодів або (аналогова) – або зміною тривалості імпульсів живлення (ШІМ).

9. IP<sub>xx</sub> захист – ступінь захисту електронних компонент від проникнення твердих предметів і води (відповідно до міжнародних стандартів IEC 60529, або DIN 40050). Перша позиція індексу вказує на захист від проникнення сторонніх предметів (табл. 7.1) друга – на захист від проникнення рідини (табл. 7.2).

Таблиця 7.1 – Рівень захисту від проникнення сторонніх предметів

Рівень	Захист від сторонніх предметів діаметром, мм	Опис
0	–	Немає захисту
1	>50	Великі поверхні тіла, немає захисту від свідомого контакту
2	>12,5	Пальці та подібні об'єкти
3	>2,5	Інструменти, кабелі тощо
4	>1 (немає захисту)	Більшість дротів, болти тощо
5	Пилозахисні	Деяка кількість пилю може проникнути всередину, але це не порушує роботу пристрою. Повний захист від контактів
6	Пилонепроникні	Пил не може потрапити всередину пристрою. Повний захист від контактів



Таблиця 7.2 – Рівень захисту від проникнення рідини

Рівень	Захист від проникнення рідини	Опис
0	–	Нема захисту
1	Вертикальні краплі	Вертикально падаюча вода не повинна порушувати роботу пристрою
2	Вертикальні краплі під кутом до 15 °	Вертикально падаюча вода не повинна порушувати роботу пристрою, якщо його нахилити від робочого положення на кут до 15 °
3	Падаючі бризки	Захист від дощу. Вода ллється вертикально або під кутом до 60° до вертикалі
4	Бризки	Захист від бризок, падаючих у будь-якому напрямку
5	Струмінь	Захист від водних струменів з будь-якого напрямку
6	Морські хвилі	Захист від морських хвиль або сильних водяних струменів. Вода, що потрапила в корпус, не повинна порушувати роботу пристрою

10. Коефіцієнт потужності ( $\cos\varphi$ ) – характеризує ступінь лінійності навантаження (в цьому разі ПК) і дорівнює відношенню споживаної ПК активної потужності до повної потужності. Чим менше цей коефіцієнт, тим нижче якість споживаної енергії.

Таблиця 7.3 – Коректори коефіцієнта потужності

Значення КП	Високе	Добре	Задовільне	Низьке	Незадовільне
$\cos\varphi$	>0,95	0,8–0,95	0,65–0,8	0,5–0,65	<0,5

Для його підвищення до значення, близького до одиниці, застосовуються так звані коректори коефіцієнта потужності (далі – КП) (табл. 7.3).

### 7.3 Широтно-імпульсна модуляція

Принцип широтно-імпульсної модуляції (далі – ШІМ або в англійській транскрипції PWM – Pulse Width Modulation) стосовно до нашого випадку полягає в керуванні яскравістю світіння світлодіодів шляхом зміни тривалості імпульсів живлення.

Світлодіоди в цьому разі живляться імпульсами струму постійної амплітуди й частоти, але зі змінним коефіцієнтом заповнення імпульсів – відношення тривалості слідкування імпульсів до цього періоду – величина, обернена скважності.

Графічно принцип ШІМ можна падати такими діаграмами (рис. 7.11, 7.12).

Уявимо, що коефіцієнт заповнення імпульсів становить 30 %. У цьому разі за рахунок інерційності сприйняття людського ока яскравість світіння світлодіодів буде сприйматися так, ніби через них проходить постійний струм величиною 30 % від амплітудного значення.

У разі коефіцієнта заповнення, наприклад 80 %, яскравість світіння світлодіодів буде еквівалентна яскравості світлодіодів, які живляться постійним струмом рівним 80 % від амплітудного значення.

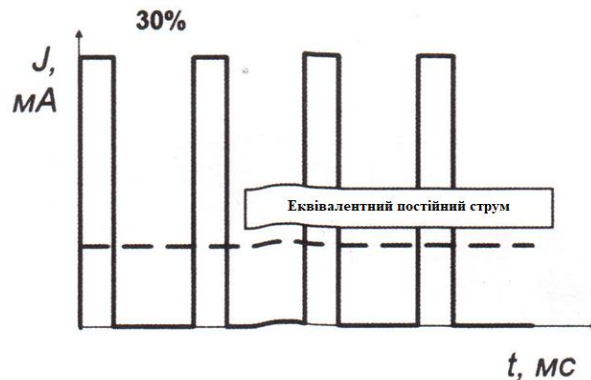


Рисунок 7.11 – Імпульсне живлення з коефіцієнтом заповнення 30 %

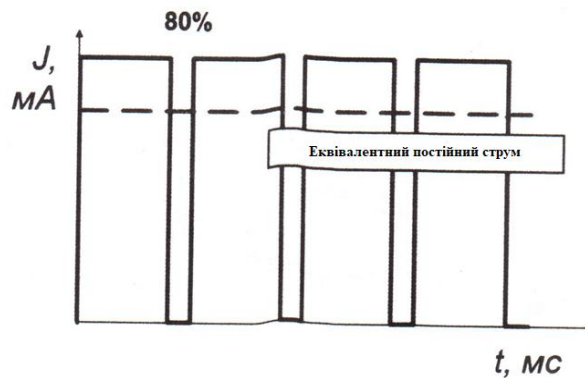


Рисунок 7.12 – Імпульсне живлення з коефіцієнтом заповнення 80 %

Частота прямування імпульсів вибирається, зазвичай, у діапазоні від 100 Гц до 1 000 Гц. Обмеження цього діапазону знизу зумовлено психофізіологічними особливостями зорового сприйняття людського ока (світлові імпульси з частотою 1 000 Гц і вище сприймаються зором як неперервне світіння), а зверху – підвищеннями звуковими й електромагнітними завадами, які вносяться в навколишнє середовище.

#### 7.4 Електронне забезпечення світлодіодних освітлювальних систем

Створення світлодіодних систем освітлення вимагає забезпечення параметрів електронних систем керування такими системами щодо надійності, безпеки, довговічності та відповідності електричних параметрів існуючим стандартам. Ці задачі ускладнюються під час створення малогабаритних освітлювальних приладів, де велика кількість елементів електронної схеми інтегрується в обмеженому обсязі. Елементи, розташовані на малій відстані, мають можливість впливати на теплові та електричні режими сусідніх елементів.

Основними вимогами під час проектування сучасних електронних схем керування (драйверів) світлодіодними освітлювальними системами є такі:

- високий коефіцієнт корисної дії (80–98 %);
- висока стабільність вихідного струму (для живлення світлодіодів);
- широкий діапазон вихідних напруг при стабілізованому струмі;
- високий фактор потужності ( $>0,9$ );
- низькі пульсації вихідного струму і, як наслідок, світлового потоку світлодіодів (менше ніж 20 %);
- стабільність роботи драйвера за широкого діапазону напруг джерел живлення (220 В/50 Гц).

Для проектування різних конструкцій світлотехнічних систем необхідно вибирати тип електронної системи керування згідно з вимогами до її параметрів. Класифікацією електронних схем керування (далі – ЕСК) наведено на рисунку 7.13, де продемонстровано поділ електронних схем керування за параметрами, які вони можуть забезпечити, конструктивними особливостями.



Рисунок 7.13 – Класифікації електронних схем керування

Існують вимоги до гальванічного розв'язання струмопровідних частин від мережі живлення. За цими вимогами ЕСК поділяються на гальванічно

нерозв'язані та гальванічно розв'язані. Блок-схеми таких ЕСК наведені на рисунках 7.14 та 7.15. Так, гальванічно нерозв'язані схеми керування застосовують в конструкціях, де гарантується відсутність прямого контакту людини з металевим (або неметалевим, але електропровідним) радіатором охолодження світлодіодів, або корпусом освітлювального приладу.

Гальванічно розв'язані ЕСК можна застосовувати в різних конструкціях, але потрібно зважати на те, що їхня вартість значно більша, ніж у гальванічно нерозв'язаних. Тому гальванічно розв'язані ЕСК використовують у конструкціях, де струмопровідний радіатор є безпосередньо доступний для контакту з людиною.

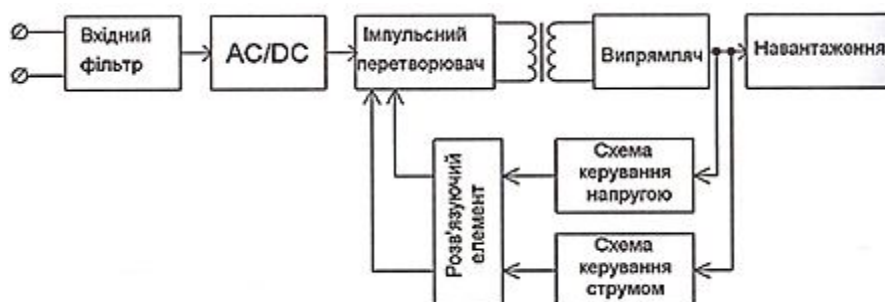


Рисунок 7.14 – Блок-схема гальванічно розв'язаної електронної схеми керування



Рисунок 7.15 – Блок-схема гальванічно нерозв'язаної електронної схеми керування

Іншим важливим електричним параметром усіх ЕСК, який потрібно забезпечити, є коефіцієнт потужності. Існують три типи ЕСК з пасивним коректором коефіцієнта потужності, активним коректором та без коректора коефіцієнта потужності. Основною перевагою ЕСК з пасивним коректором коефіцієнта потужності є її простота реалізації, але значення коефіцієнта потужності, якого можна досягнути при цьому, не більше 0,85. Більш прогресивною вважається ЕСК з активним коректором коефіцієнта потужності. Вона може забезпечити коефіцієнт потужності до 0,99, але є складнішою у виконанні. Діаграма вхідного струму, напруги та схемні рішення трьох типів ЕСК наведені на рисунку 7.16.

З епюр бачимо, що струм на вході ЕСК без коректора коефіцієнта потужності зовсім не описує форму вхідної напруги й містить вузькі піки. Форма струму ЕСК з пасивним коректором коефіцієнта потужності близька до форми напруги, але при цьому видно високі флуктуації струму. Найкраще вхідну напругу повторює вхідний струм ЕСК з активним коректором коефіцієнта потужності, що й забезпечує високий коефіцієнт потужності.

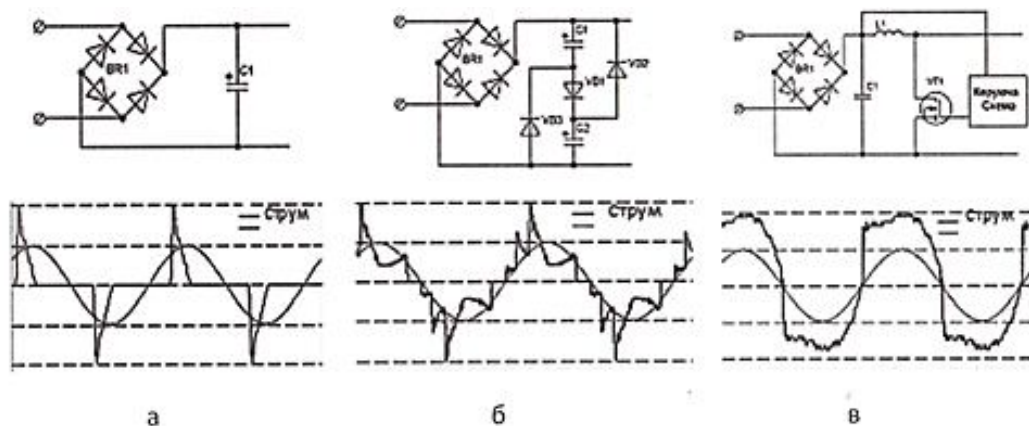


Рисунок 7.16 – Епюри вхідної напруги та струму ЕСК: а – без коректора коефіцієнта потужності; б – з пасивним коректором коефіцієнта потужності; в – з активним коректором коефіцієнта потужності та їхні схеми реалізації

Високий коефіцієнт потужності забезпечує низький рівень емісії струмових гармонік. Максимальне нормоване амплітудне значення кожної гармоніки обмежене на території України нормативним документом ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004. Відповідно освітлювальні прилади, які працюють у загальній мережі 220 В, повинні забезпечувати рівень гармонік нижче, ніж зазначені в ДСТУ. Розглянемо гістограми гармоніки для різних типів ЕСК (рис.7.17-7.19).

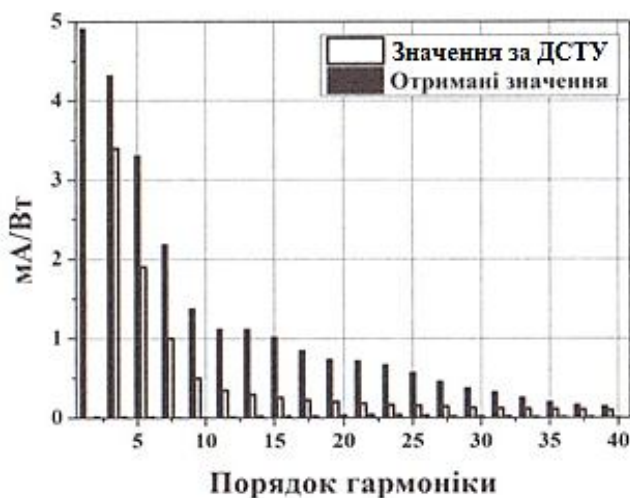


Рисунок 7.17 – Величина струмових гармонік схеми керування без коректора коефіцієнта потужності та їхнє порівняння з ДСТУ

Електронні схеми керування з активним коректором коефіцієнта потужності, зі свого боку, поділяються на три типи, які приведені в таблиці 7.4.



Рисунок 7.18 – Величина струмових гармонік схеми керування з пасивним коректором коефіцієнта потужності та їхнє порівняння з ДСТУ

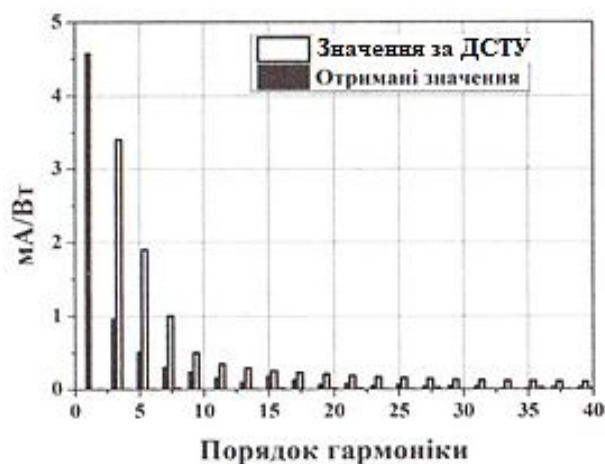


Рисунок 7.19 – Величина струмових гармонік схеми керування з активним коректором коефіцієнта потужності та їхнє порівняння з ДСТУ

В ЕСК без коректора коефіцієнта потужності амплітудні значення всіх гармонік перевищують допустимі значення, а в ЕСК з пасивним коректором частково перевищують, тому дані ЕСК не відповідають нормам з емісії гармонік. Єдина ЕСК, яка відповідає цим нормам, є ЕСК з активним коректором коефіцієнта потужності, оскільки всі отриманні значення гармонік нижче допустимих.

Таблиця 7.4 – Типи ЕСК з активним коректорами коефіцієнта потужності

№	Тип схеми	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
1	Двокаскадні ЕСКА (коректор коефіцієнта потужності та перетворювач зі стабілізацією по струму)	Працюють у широкому діапазоні вхідних напруг. Низький рівень НЧ пульсацій на виході.	Висока вартість. Великі втрати при використанні на потужностях менше ніж 30 Вт.
2	Однокаскадні ЕСК з суміщеним коректором коефіцієнта потужності	Невисока вартість. Невеликі габарити.	Високий рівень НЧ пульсацій, що залежить від вихідного конденсатора. Високі значення пульсації струму, що призводить до передчасного виходу з ладу вихідного електролітичного конденсатора.



Продовження таблиці 7.4

1	2	3	4
3	Однокаскадні ЕСК з суміщеним коректором коефіцієнта потужності та додатковим активним фільтром на виході	Низький рівень НЧ пульсації. Нижча вартість відносно двокаскадної схеми.	Низький рівень коефіцієнта корисної дії. Більші габарити відносно однокаскадної схеми керування.

З трьох типів ЕСК з активним коректором коефіцієнта потужності (рис. 7.20–7.22) тільки однокаскадні ЕСК можуть використовуватись в освітлювальних пристроях із малими габаритними розмірами. Використання двокаскадних ЕСК недоцільне при потужності менше ніж 30 Вт, оскільки це обумовлює високі втрати. Також з осцилограм видно, що недоліком однокаскадних ЕСК є пульсації вихідного струму, які можна зменшувати шляхом використання вихідного конденсатора з великою ємністю або активного фільтра.

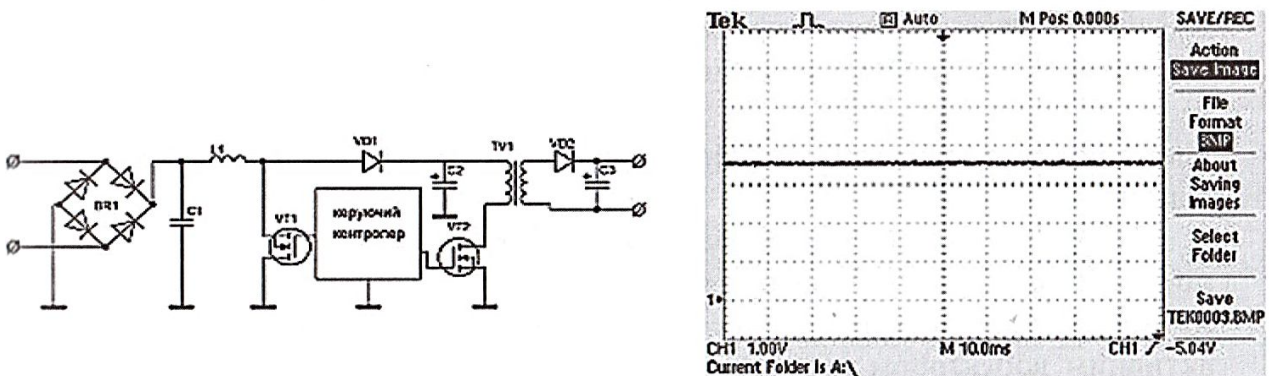


Рисунок 7.20 – Осцилограми струму, що протікає через світлодіоди, для двокаскадної ЕСК та схема їхньої реалізації

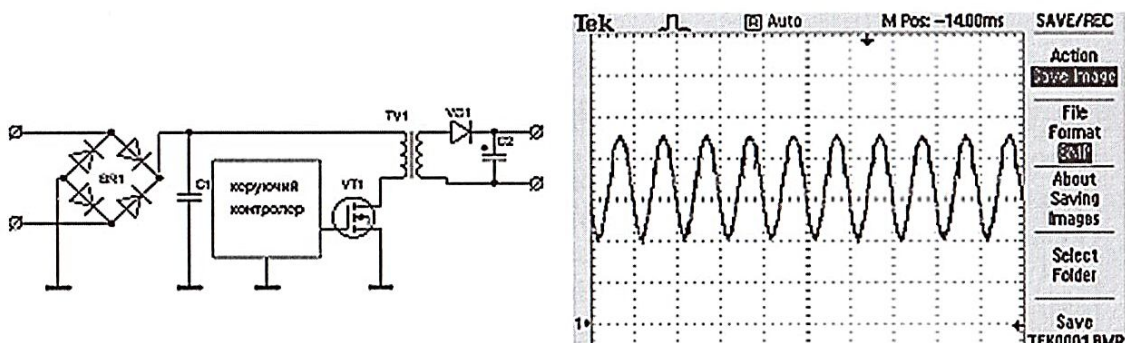


Рисунок 7.21 – Осцилограми струму, що протікає через світлодіоди, для однокаскадної ЕСК (в) та схема їхньої реалізації



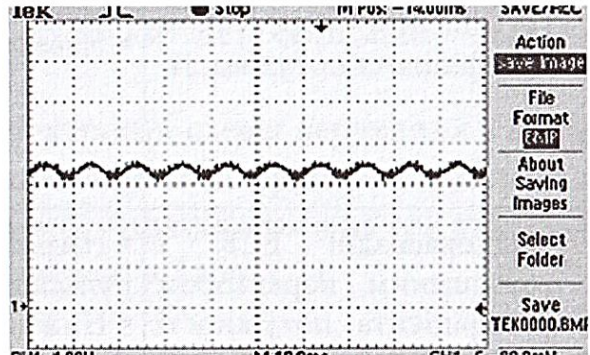
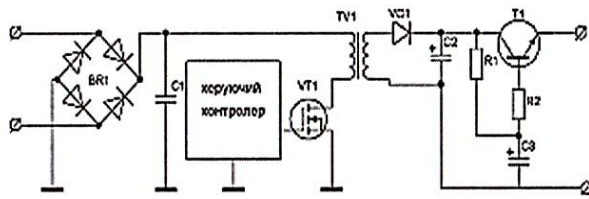


Рисунок 7.22 – Осцилограми струму, що протікає через світлодіоди, для однокаскадної з активним фільтром на виході ЕСК та схема їхньої реалізації

Вибір правильного типу ЕСК ще не гарантує стабільність її роботи та довговічність. Потрібно провести правильний вибір типів електронних компонентів. Так, у кожній із наведених схем є електролітичні конденсатори, які мають властивість із часом втрачати свою ємність, що пов'язане з випаровуванням електроліту. Оскільки електронна схема керування працює зазвичай у порожнині радіатора, що розсіює тепло від світлодіодів (властиво світлодіодним лампам із цоколем E27), то вона піддається додатковому нагріванню з боку радіатора. Це ще більше погіршує ситуацію з довговічністю та напрацюванням годин на відмову. Як бачимо з рисунка 7.23, габаритні розміри конденсаторів з однаковими параметрами, але різним часом напрацювання на відмову суттєво відрізняються, що ускладнює використання електролітичних конденсаторів із великим часом напрацювання на відмову.

Наведемо лише один приклад розробленої ЕСК для світлодіодних ламп потужністю 4–6 Вт. Оскільки ЕСК повинна відповідати нормам ДСТУ за коефіцієнтом гармонік та коефіцієнта потужності, використано ЕСК з активним коректором коефіцієнта потужності, і вона є однокаскадною зі збільшеним вихідним фільтруючим електролітичним конденсатором. Дослідний зразок ЕСК зображено на рисунку 7.24.

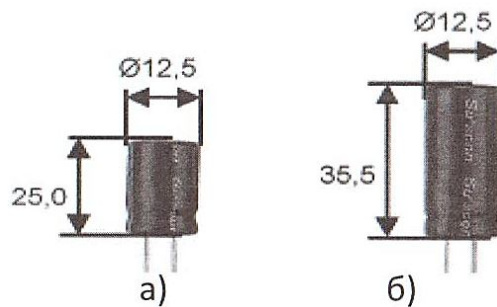


Рисунок 7.23 – Габаритні розміри конденсаторів з ємністю 2 200 мкФ і максимальною напругою 25 В на 1 000 год (а) та 10 000 год (б) напрацювання на відмову при температурі навколишнього середовища 105°

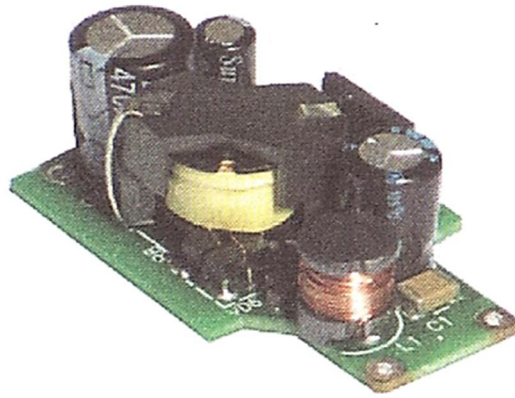


Рисунок 7.24 – Розроблений дослідний зразок ЕСК

Характеристики змін вихідного струму, коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта гармонік, коефіцієнта потужності від змінної вхідної напруги частотою 50 Гц при навантаженні на 4, 5 та 6 світлодіодів (рис. 7.25–7.28).

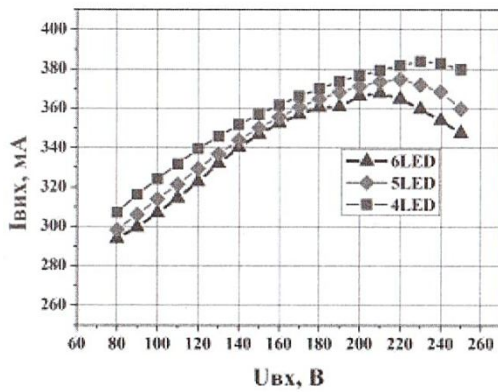


Рисунок 7.25 – Залежність вихідного струму від вхідної напруги

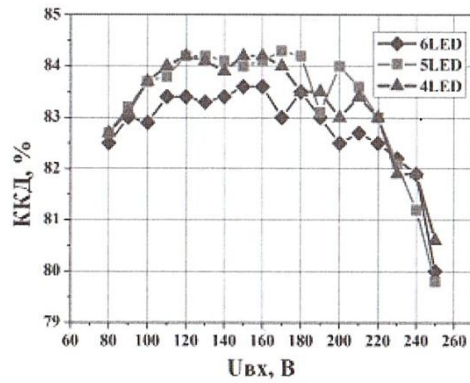


Рисунок 7.26 – Залежність коефіцієнта корисної дії (ККД) від вхідної напруги

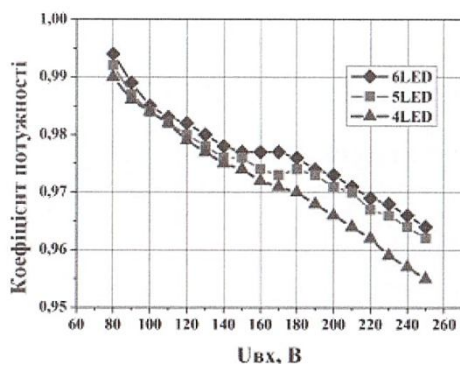


Рисунок 7.27 – Залежність коефіцієнта потужності від вхідної напруги

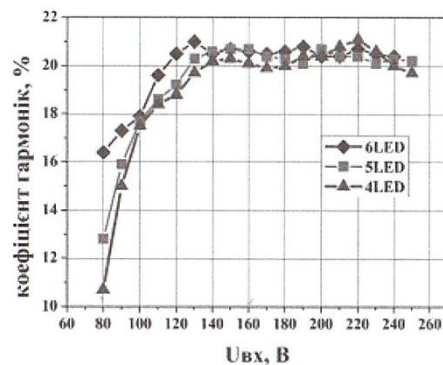


Рисунок 7.28 – Залежність коефіцієнта гармонік по струму від вхідної напруги

Отримані результати довели, що ЕСК здатна працювати в широкому діапазоні вхідної напруги 80–250 В, при цьому зміна вихідного струму становить 18 %, а якщо врахувати роботу ЕСК в загальній мережі ( $220 \pm 10$  %), то отримаємо 2,5 %. ЕСК забезпечують значення коефіцієнта потужності більше ніж 0,95, коефіцієнта гармонік – менше ніж 22 % та ККД більше 80 %.

Під час проектування також потрібно врахувати охолодження елементів, що нагріваються, таких як: ключовий транзистор, вихідний випрямляючий діод, трансформатор, діоди в колі захисту транзистора та інші. Тому під час проектування топології елементів схеми необхідно передбачити додаткові охолоджувальні полігони та розташовувати елементи з врахування їхнього нагріву, щоб зменшити тепловий вплив та інші елементи, для яких небажаний додатковий нагрів.

Для перевірки теплового режиму роботи елементів ЕСК та динаміки розповсюдження тепла по друкованій платі використовувався тепловізор FLIR-SC305. Тепловізійні картини нижнього та верхнього боку друкованої плати подано на рисунку 7.29.

З рівномірності розповсюдження тепла верхнього та нижнього боку плати ЕСК і малої кількості локальних максимумів можна зробити висновок, що відведення тепла виконано правильно.

Окрім отриманої картини розповсюдження тепла, було проконтрольовано динаміку розігріву елементів ЕСК (рис. 7.30, рис. 7.31), які найбільше нагріваються або піддаються додатковому нагріванню. Отримавши ці дані можна вважати, що розігрів елементів приходить з однаковою швидкістю та загальний час їх прогріву складає 26 хв.

Оскільки ЕСК має працювати в конструктиві та піддаватися додатковому нагріванню від радіатора, було проведено додаткове дослідження стабільності вихідного струму від температури навколишнього середовища, яку задавали в термокамері BINDER MK53. Відповідні експериментальні дані надано на рисунку 7.32.

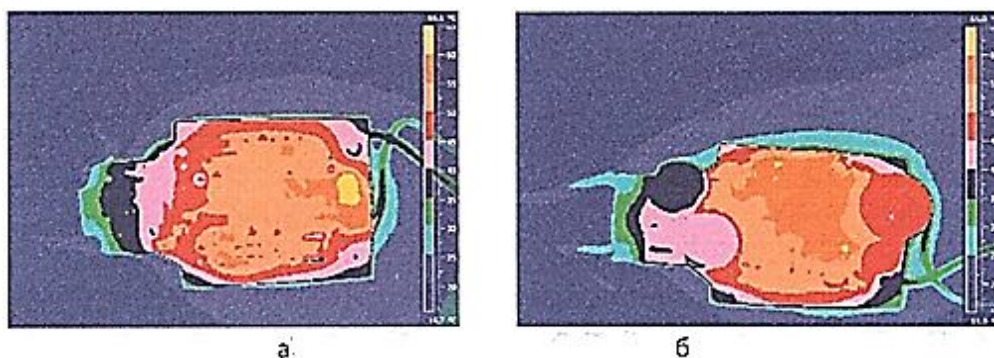


Рисунок 7.29 – Тепловізійні картини нижнього (а) та верхнього (б) боків друкованої плати ЕСК

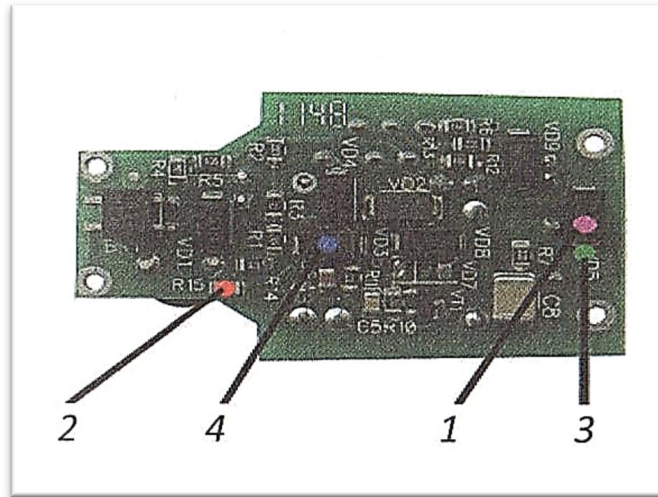


Рисунок 7.30 – Друкована плата з вибраними елементами (точками) контролю температури

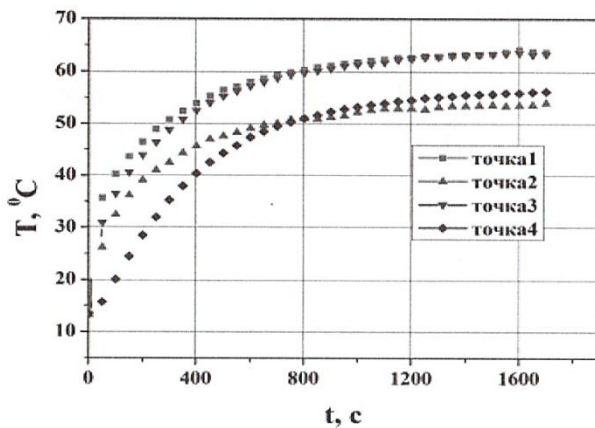


Рисунок 7.31 – Зміна температури вибраних елементів (точок) на друкованій платі з моменту ввімкнення до повного прогріву

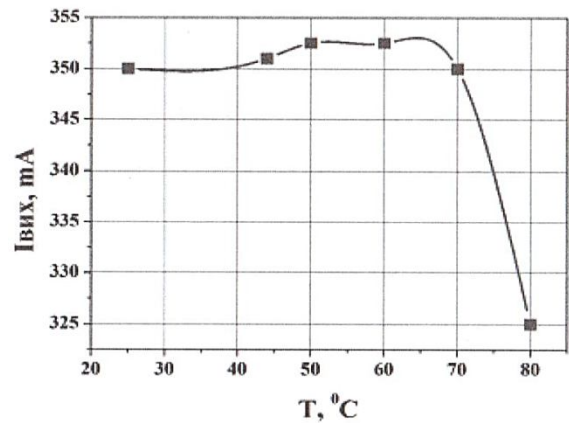


Рисунок 7.32 – Зміна вихідного струму ЕСК від температури навколишнього середовища лампи

З рисунка 7.32 видно що зміна струму при зміні температури від 20 °С до 70 °С становить менше ніж 1%. Подальше збільшення температури ЕСК призводить до повільного зменшення струму та вимикання системи по захисту від перегрівання.

Протягом 2009–2014 рр. в Інституті фізики напівпровідників була розроблена серія електронних схем керування для живлення світлодіодних ламп, світильників для об'єктів житлово-комунального господарства, бюджетної сфери тощо. У таблиці 7.4 (дод. Б.1) наведено параметри та характеристики розроблених схем та порівняння їх з зарубіжними аналогами.



## 8 СВІТЛОДІОДНІ СВІТИЛЬНИКИ

Прогрес у розробці потужних світлодіодів дозволив їм увійти в сферу інтересів освітлення. Це призвело до появи великої кількості пропонуємих світлодіодних світильників. Виготовленням світильників займаються як великі імениті фірми, так і маловідомі невеликі компанії. Сучасний світлодіодний вуличний світильник виготовляється із різних деталей: радіатора (корпусу), друкованої плати, світлодіодів або матриць, лінз для формування кривої сили світла або дзеркальних відбивачів, розсіювачів, елементів перетворення напруги або стабілізаторів струму (драйверів) різних форм і розмірів.

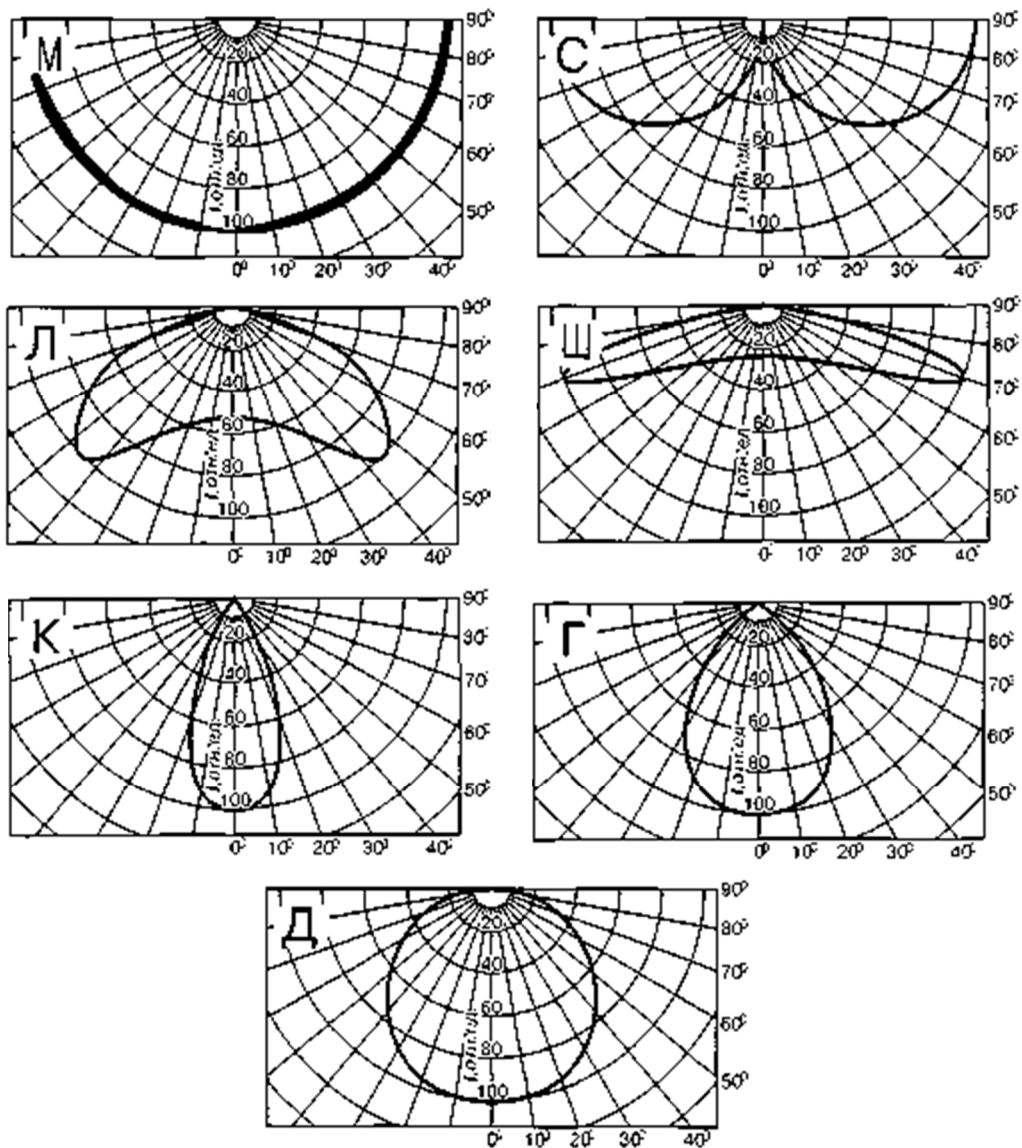


Рисунок 8.1 – Криві сили світла світильників: М – рівномірна; С – синусна; Л – напівширока; Ш – широка; К – концентрована; Г – глибока; Д – косинусна

Важливим світлотехнічним параметром світлових приладів є світлорозподіл. Зазвичай, джерела світла (крім світлодіодів) випромінюють світло у всі сторони більш або менш рівномірно. Для ефективного використання світла за допомогою оптичної системи світлового приладу перерозподіляється в просторі. Характер перерозподілу описується кривою сили світла (далі-КСС). Стандартами зумовлені сім типів кривих сили світла: концентрована, глибока, косинусна, напівширока, широка, рівномірна й синусна.

Залежно від призначення світлового приладу він повинен мати певну КСС. Наприклад, для освітлення високих приміщень оптимальні глибока й концентрована КСС, а для вуличного освітлення – широка. У низці випадків потребується асиметричний розподіл, наприклад, для освітлення картин в музеї або класних дошок у навчальних закладах.

З появою потужних світлодіодів зі струмом 350 мА, а тепер 700 мА і навіть 1 000 мА, більшість виробників світлодіодів стали відмовлятися від застосування первинної оптики, оскільки при роботі потужних світлодіодів кристали нагріваються достатньо сильно, і через різницю коефіцієнтів теплового розширення матеріалів кристала й первинної оптики створюються значні механічні навантаження всередині світлодіодів, які призводять інколи до розриву з'єднувальних провідників або відриву кристала від підкладки.

Тому для формування необхідного світлорозподілу застосовується вторинна оптика у вигляді лінз або відбивачів (рис. 8.3).

Світлодіоди є площинними джерелами випромінення. Розташовуючись на підкладці кристал випромінює в напівпростір. Тому всі світлодіодні застосування можна розподілити загалом на дві групи з прямою та непрямою конфігурацією (рис. 8.2).

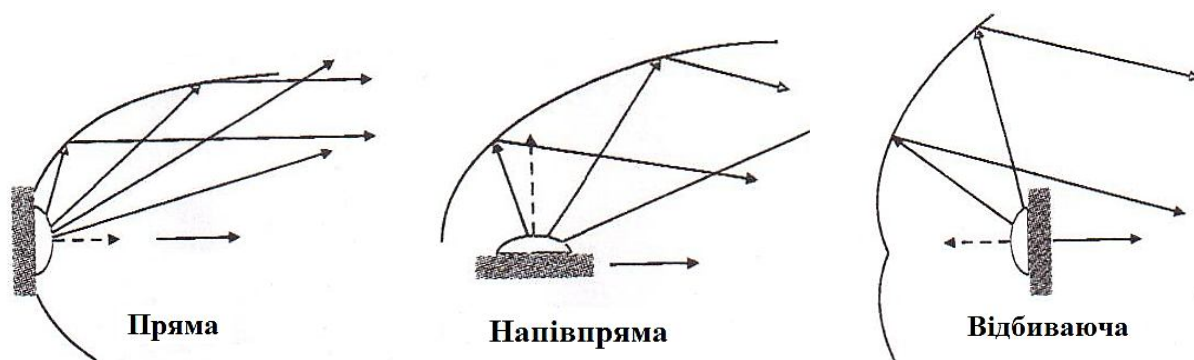


Рисунок 8.2 – Конфігурації світлодіодів із вторинною оптикою

У прямій оптичній конфігурації оптична вісь джерела світла паралельна головній оптичній вісі відбивача.

На протилежність системам із прямої конфігурації випромінення повністю керується відбивачами довільної форми.

Можливі також і проміжні (напівпрямі) конфігурації оптичної системи. Така класифікація стосується переважно до застосувань із відбивачем. У рішеннях, де застосовуються коліматори з оптичними елементами повного внутрішнього відбиття (TIR – total internal reflection), проєктори й заломлювальні системи, зазвичай використовується пряма конфігурація, і лише в деяких випадках – непряма.



Рисунок 8.3 – Елементи вторинної оптики світлодіодів

Лінзи виробляються із поліметилметакрилату, полікарбонату або кремнійорганічних з'єднань (силікону). Лінзи випускаються для одиночних світлодіодів, світлодіодних зібрань (модулів, матриць) або у вигляді цілих блоків, що охоплюють більшу групу світлодіодів.

Під час конструювання світлових приладів необхідно враховувати, що за рахунок френелівських відбивань на передній і задній поверхні лінз втрачається не менше 8% світлового потоку.

Завдяки тому, що світлодіоди випромінюють світло тільки в одну напівсферу, можливості відбивальної оптики в світлових приладах із ними обмежені. Відбивачі мають декілька більші розміри, ніж лінзи. Коефіцієнт використання світлового потоку кристалів із відбивачами – близько 85–90 %. Відбивачі виробляють із алюмінію з високим коефіцієнтом відбивання (наприклад типу «Miro» – фірми «Аланод») або із пластика з напиленням дзеркального шару й захистом його від зовнішнього впливу.

Як лінзи, так і відбивачі потребують дуже точного розташування відносно випромінювального кристала. Тому вони, зазвичай, мають спеціальні напрямні для точної установки.

Елементи вторинної оптики формують необхідну КСС світильників. Зараз випускаються лінзи й відбивачі, які забезпечують широкі, напівширокі, косинусні, глибокі та концентровані КСС. Для вуличних світильників



виробляються лінзи з асиметричним світлорозподілом (широким у поперечній площині й концентрованим боковим у продовженні).

## 8.1 Лінзова оптика

У більшості практичних застосувань потребується, щоб світлові прилади мали певну криву сили світла (далі – КСС). Проте КСС переважної більшості світлодіодів і світлодіодних модулів близька до ламбертівської (пропорційна косинусу кута від осі) (рис. 8.4).

Переважає більшість світлодіодів поверхневого монтажу або не мають лінз як таких, або лінза забезпечує КСС доволі близьку до косинусної (рис. 8.5).

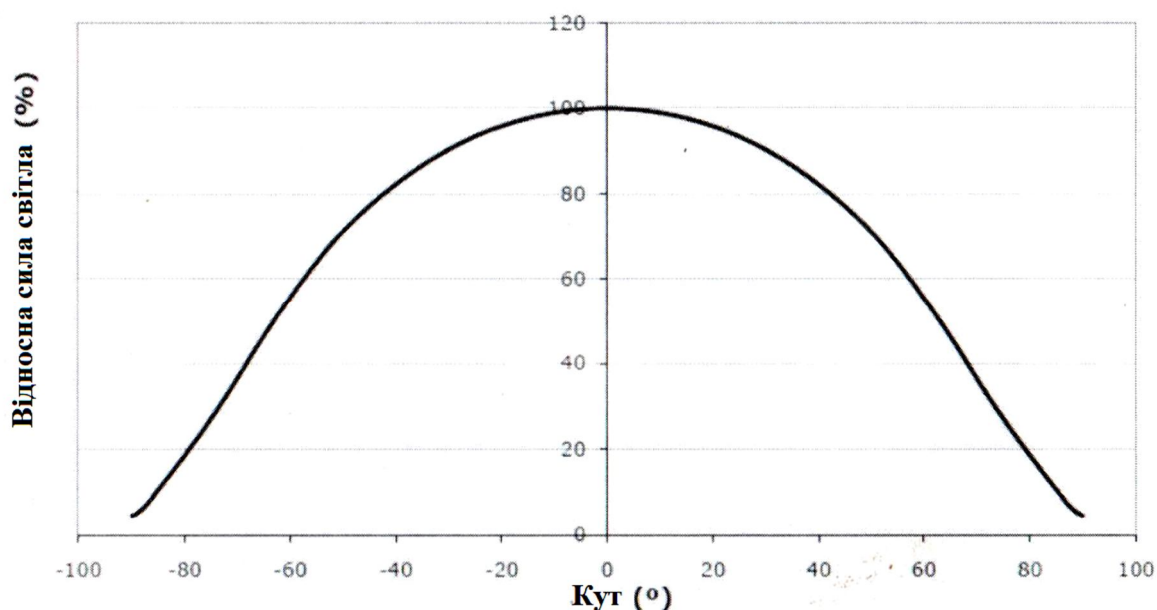


Рисунок 8.4 – Крива сили світла близька до косинусної

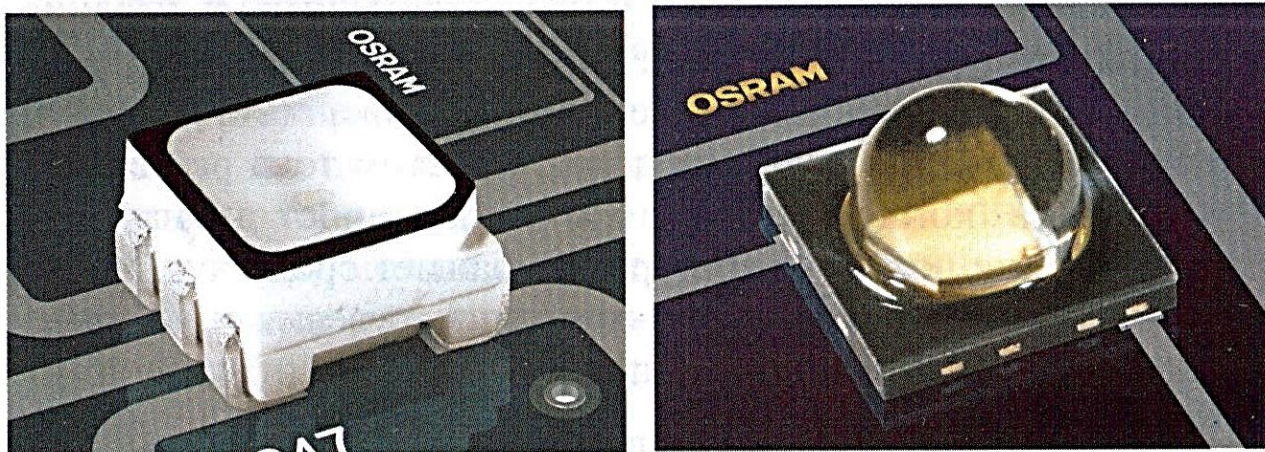


Рисунок 8.5 – Світлодіоди без лінз



Для забезпечення пристроям на основі таких СД необхідної КСС використовується так звана вторинна оптика: допоміжні лінзи, які перетворюють КСС. Перші описуються законом Ламберта, в потрібну для певного застосування (рис. 8.6).

Недоліком такого підходу є додатні світлові втрати в лінзі, додаткова вартість у кінці готового пристрою і, крім того, вторинна оптика є додатковим джерелом деградації в світлодіодному пристрою.

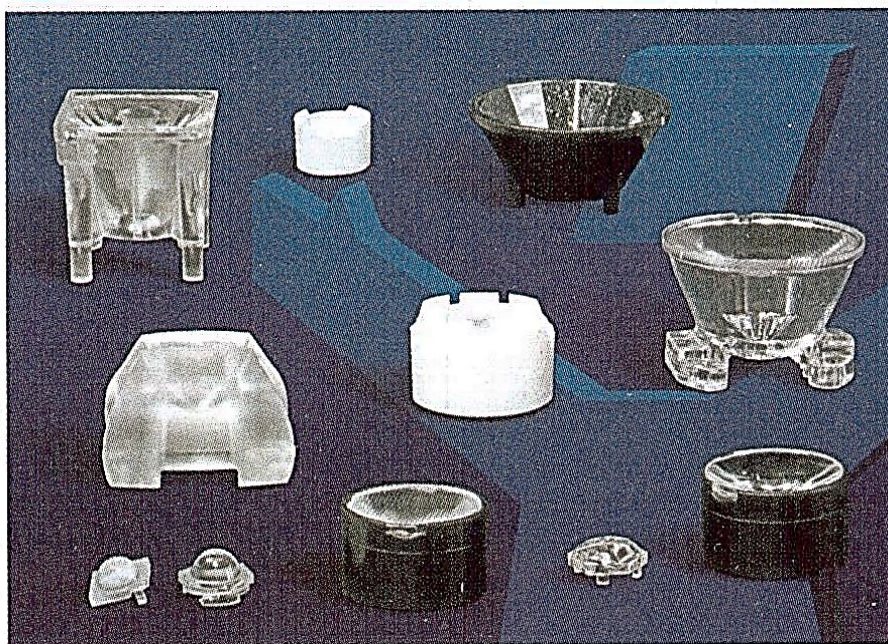


Рисунок 8.6 – Приклади вторинної лінзової оптики

Іншим підходом, який дає змогу позбутися вказаних проблем (повністю або хоча б частково), є створення світлодіодів або світлодіодних модулів із первинною оптикою, яка формує задану КСС і не потребує використання вторинної оптики (рис. 8.7).

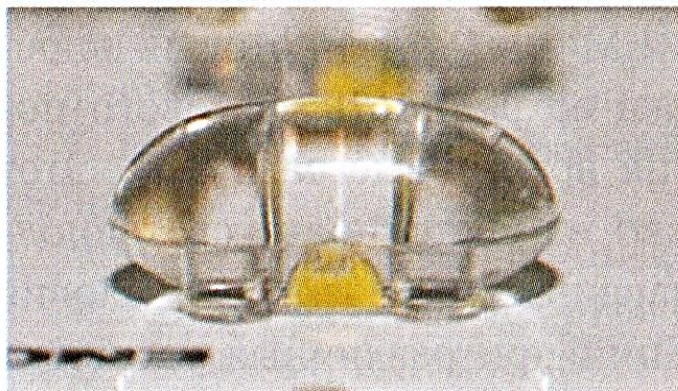


Рисунок 8.7 – Приклади первинної лінзової оптики компанії Light Engines (а) і фірми OSRAM (б)

## 8.2 Дзеркальні та дифузні відбивачі

У дзеркальних відбивачів кут відбиття променів дорівнює куту їх падіння. Дзеркальні відбивачі є детермінованими пристроями, оскільки в них кути відбиття завжди задаються кутами падіння променів. Дифузні відбивачі поведуть протилежним чином, що показано на рисунку 8.8. Інтенсивність відбитого випромінення у них розподілена по широкому діапазону кутів, які незалежні від кутів падіння променів. Далі будуть розглянуті властивості ламбертівських джерел випромінення та ламбертівських відбивачів, після чого перейдемо до питань їх використання у структурах світлодіодів.

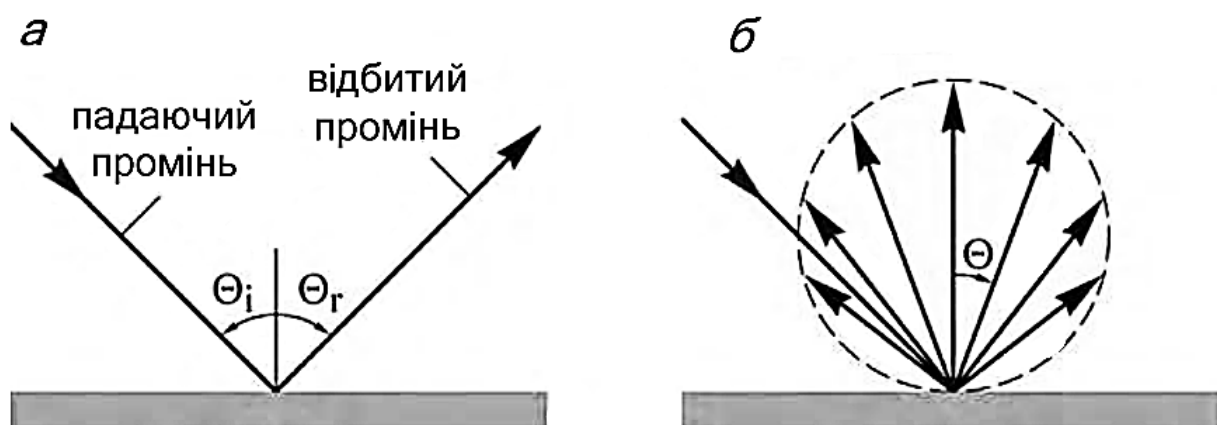


Рисунок 8.8 – Схематичне зображення дзеркального (а) і дифузного (ламбертівського) відбивачів (б). Розподіл потужності відбитого дифузним відбивачем випромінення залежить від косинусу кута

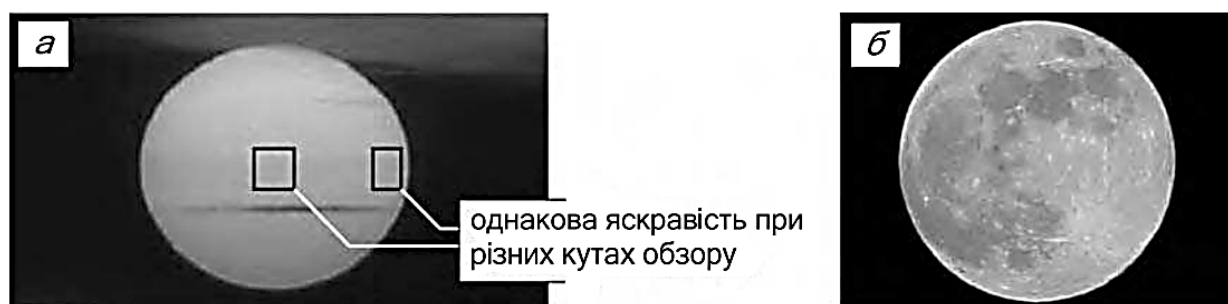


Рисунок 8.9 – Яскравість поверхні Сонця не залежить від кута спостереження. Сонце – хороший приклад ламбертівського джерела випромінення (а); Місяць - хороший приклад ламбертівського відбивача (б)

Джерелами з ламбертівською діаграмою спрямованості випромінення називають джерела, випромінення яких залишається постійним незалежно від кута спостереження. Під випроміненням тут розуміється оптична потужність, яка випромінюється одиницею площі поверхні джерела у межах просторового кута, що дорівнює одному стерadianу. З цього визначення, яке є результатом

багатьох експериментів, впливає, що випромінення та яскравість ламбертівських джерел не залежить від кута спостереження. Самим яскравим прикладом ламбертівських джерел випромінення є Сонце. Як зображено на рисунку 8.8 а, будь-які ділянки сонячної поверхні мають однакову яскравість, що не залежить від кута спостереження. Це означає, що від того, під яким кутом ми будемо дивитись на поверхню Сонця (під прямим або будь-яким іншим), яскравість світіння цих ділянок не зміниться. З цієї самої причини Місяць, зображений на рисунку 8.9 б, можна вважати хорошим прикладом ламбертівського відбивача. Дифузні або ламбертівські відбивачі відбивають фотони, які долітають до них у довільному напрямку.

Припустимо, що інтенсивність випромінення (оптична потужність випромінення всередині просторового кута, що дорівнює одному стерadianу) ламбертівського джерела вздовж напрямку, який задано кутом  $\theta$ , визначається виразом:

$$I = I_n \cdot \cos\theta, \quad (8.1)$$

де  $I_n$  – інтенсивність випромінення по нормалі до поверхні відбивача.

Цей вираз називаються законом косинуса Ламберта. Далі буде показано, що наслідком закону Ламберта є незалежність випромінення джерела або його яскравості у радіометричних одиницях від кута спостереження відносно до поверхні джерела. Нехай площа поверхні ламбертівського джерела дорівнює  $A$ . Спостерігач, що знаходиться під кутом  $\theta$  до поверхні джерела буде бачити проекцію цієї поверхні  $A \cdot \cos\theta$ . Тому він буде оцінювати яскравість джерела як:

$$\text{яскравість} = \frac{I_n \cos\theta}{A \cos\theta} = I_n, \quad (8.2)$$

де  $A \cdot \cos\theta$  – площа поверхні джерела, яку бачить спостерігач.

Із виразу (8.2) бачимо, що незалежно від кута огляду яскравість джерела буде залишатись постійною. Підтвердження цього факту ілюструють фото на рисунку 8.9.

Світло, що відбивається дзеркальним відбивачем у бік епітаксіального шару, буде поширюватись уздовж цього шару, як по хвилеводу. Але у випадку дифузного відбивача частина світла піде у зовнішній простір (рис. 8.10).

Оскільки для ламбертівського відбивача справедливий закон косинуса, ймовірність того, що відбите світло попаде у вихідний конус випромінення, який заданий кутом  $\theta_C$ , визначається виразом:

$$p = \frac{\int_0^{\theta_C} 2\pi \sin\theta d\theta I_n \cos\theta}{\int_0^{90^\circ} 2\pi \sin\theta d\theta I_n \cos\theta} = \frac{\int_0^{\theta_C} \sin 2\theta d\theta}{\int_0^{90^\circ} \sin 2\theta d\theta} = \frac{1 - \cos(2\theta_C)}{2}. \quad (8.3)$$

Застосовуючи закон Снеліуса ( $\bar{n}_1 \cdot \sin \theta_c = \bar{n}_2$ , де  $\bar{n}_1$  – показник заломлення хвилеводу,  $\bar{n}_1 > \bar{n}_2$ ), отримаємо:

$$p = \frac{1 - \cos[2 \arcsin(\frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1})]}{2} = \left(\frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1}\right)^2. \quad (8.4)$$

Якщо ламбертівський відбивач має одиничний коефіцієнт відбиття ( $R = 1,0$ ), інтенсивність світла всередині напівпровідникового матеріалу буде зменшуватись за законом геометричної прогресії. Після здійснення  $N$  відбиттів від меж розділу, інтенсивність випромінення знизиться до  $(1 - p)^N$ . Нехай  $N$  – кількість відбиттів, після яких інтенсивність випромінення зменшиться у  $e^{-1}$ . Тоді можна записати таке співвідношення:

$$(1 - p)^N = e^{-1}. \quad (8.5)$$

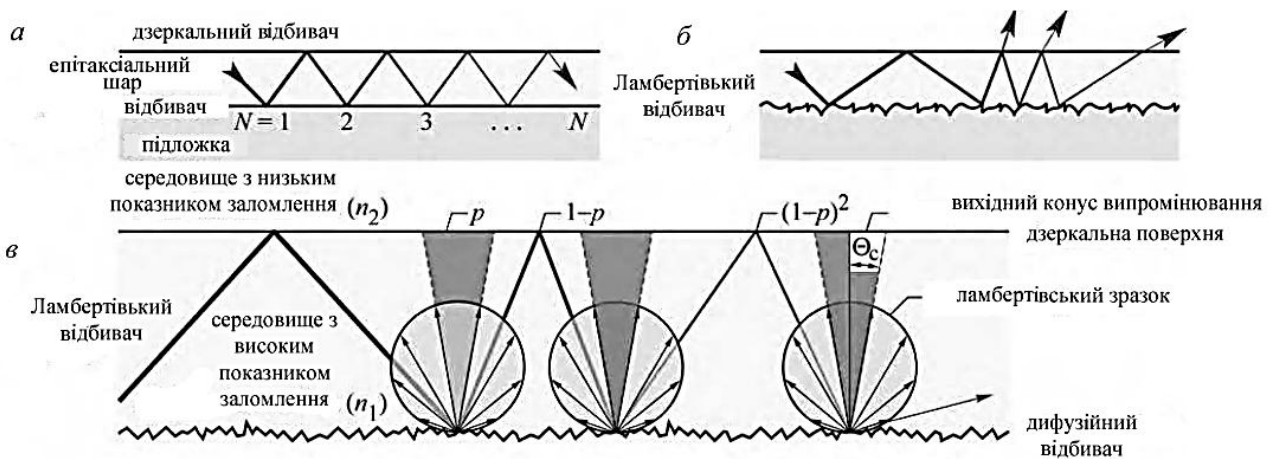


Рисунок 8.10 – Оптичний промінь, що поширюється по епітаксiальному шару як по хвилеводу, відбиваючись від дзеркальних меж розділу епітаксiальний шар-підкладка та епітаксiальний шар-повітря (а). Поширення оптичного проміння по хвилеводу, яке обмежене ламбертівським відбивачем – межею розділу епітаксiальний шар-підкладка (б) та дзеркальною межею епітаксiальний шар-повітря (в)

Розв’язавши це рівняння відносно  $N$ , визначимо кількість відбиттів, які необхідно здійснити променю світла, перед тим як вийти за межі напівпровідника:

$$N = - \left[ \ln \left( 1 - \frac{\bar{n}_2^2}{\bar{n}_1^2} \right) \right]^{-1}. \quad (8.6)$$

Як приклад розглянемо шар GaN ( $\bar{n}_1 = 2,5$ ). Якщо зовнішнім середовищем є повітря ( $\bar{n}_2 = 1,0$ ), отримаємо  $N = 5,7$ . Це означає, що промінь світла залишить



межі хвилеводу приблизно через шість дифузних відбиттів від його меж. Звідси бачимо, що введення до структури світлодіода дифузного відбивача дає змогу отримати витягнутий у горизонтальному напрямку випромінювач, в якому не відбувається зниження ефективності, що часто виникає при збільшенні розмірів кристала [51].

Підсиленням шорсткості відбиваючих поверхонь металів або діелектриків механічними методами можна змінити їхні відбивальні властивості з дзеркальних на дифузні. Іноді для формування дифузних відбивачів на металеві поверхні наносять спеціальні пористі шари, наприклад  $\text{SiO}_2$ . Це призводить до багаторазового заломлення, відбиття та розсіювання променів світла, що розширює діапазон спрямованості відбитих від поверхні фотонів.

Шорсткість поверхні ідеальних ламбертівських відбивачів повинна перевищувати довжину хвилі випромінювання  $\lambda$ . Тоді відбивальні характеристики дифузних відбивачів не будуть залежати від кутів падіння променів. Багато відбивачів із текстурованими поверхнями, що використовуються на практиці, мають змішані дзеркально-дифузні відбивальні характеристики. Такі відбивачі на відміну від чисто дифузних мають обрану спрямованість відбитих променів. На рисунку 8.11 подані діаграми спрямованості дифузного та змішаного (дзеркально-дифузного) відбивача, а також дзеркального відбивача для променя з кутом падіння  $45^\circ$ .

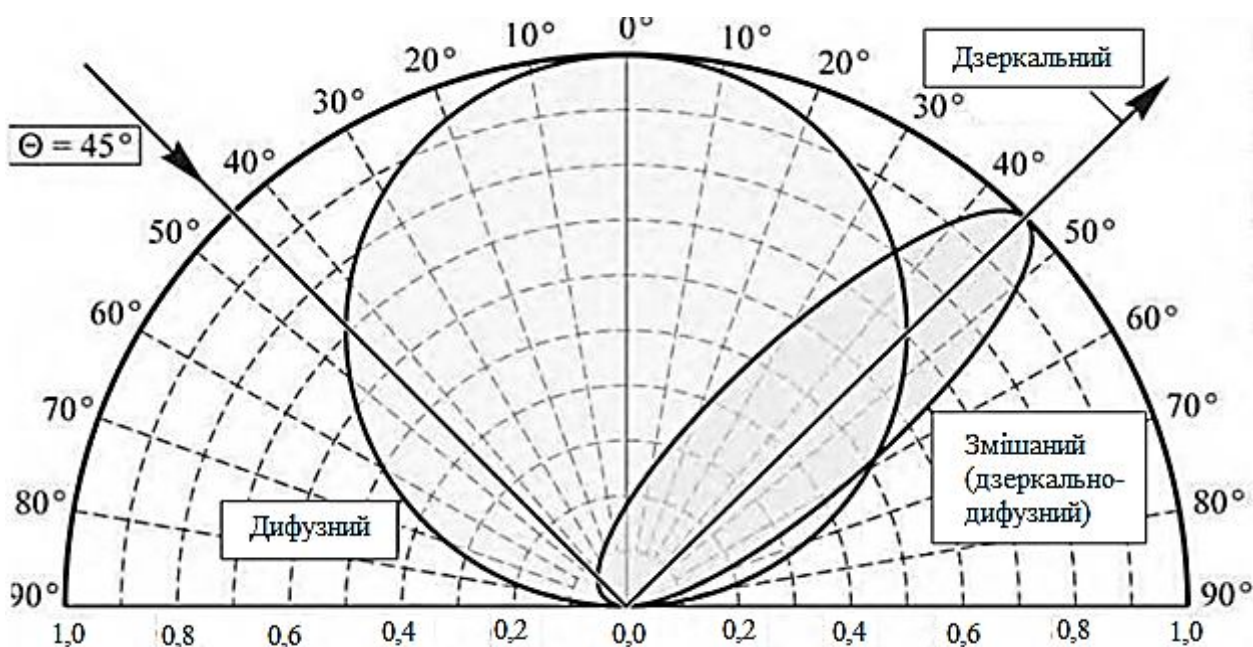


Рисунок 8.11 – Діаграми спрямованості дифузного й змішаного (дзеркально дифузного) відбивача, а також дзеркального відбивача для променя з кутом падіння  $45^\circ$

На рисунку 8.12 наведені залежності інтенсивності відбитого випромінювання від кута відбиття, експериментально отримані для планарних срібних відбивачів з гладкою та текстурованою поверхнями. Шорсткість поверхні досягалась шляхом нанесення на підкладку методом літографії сфер діаметром 700 нм із полістиролу з подальшим іонним травленням і нанесенням шару срібла. Бачимо, що дифузна відбивальна здатність текстурованого відбивача майже на два порядки вище, ніж у срібного з гладкою поверхнею. Але у текстурованого відбивача спостерігається й чіткий пік дзеркального відбиття. За допомогою моделі Зі та ін. [52] можна кількісно розрахувати співвідношення дифузної й дзеркальної компонент для змішаних (дзеркально-дифузних) відбивачів. З цієї моделі випливає, що для змішаного відбивача, що поданий на рисунку 8.12, коефіцієнт дифузного відбиття дорівнює  $P_{diff} / (P_{spec} + P_{diff}) = 42,8 \%$ . Для поданого так само частково дифузного відбивача середньоквадратичне значення шорсткості складало 21,2 нм. При ще більшому збільшенні шорсткості можна довести коефіцієнт дифузного відбиття до 100 %.

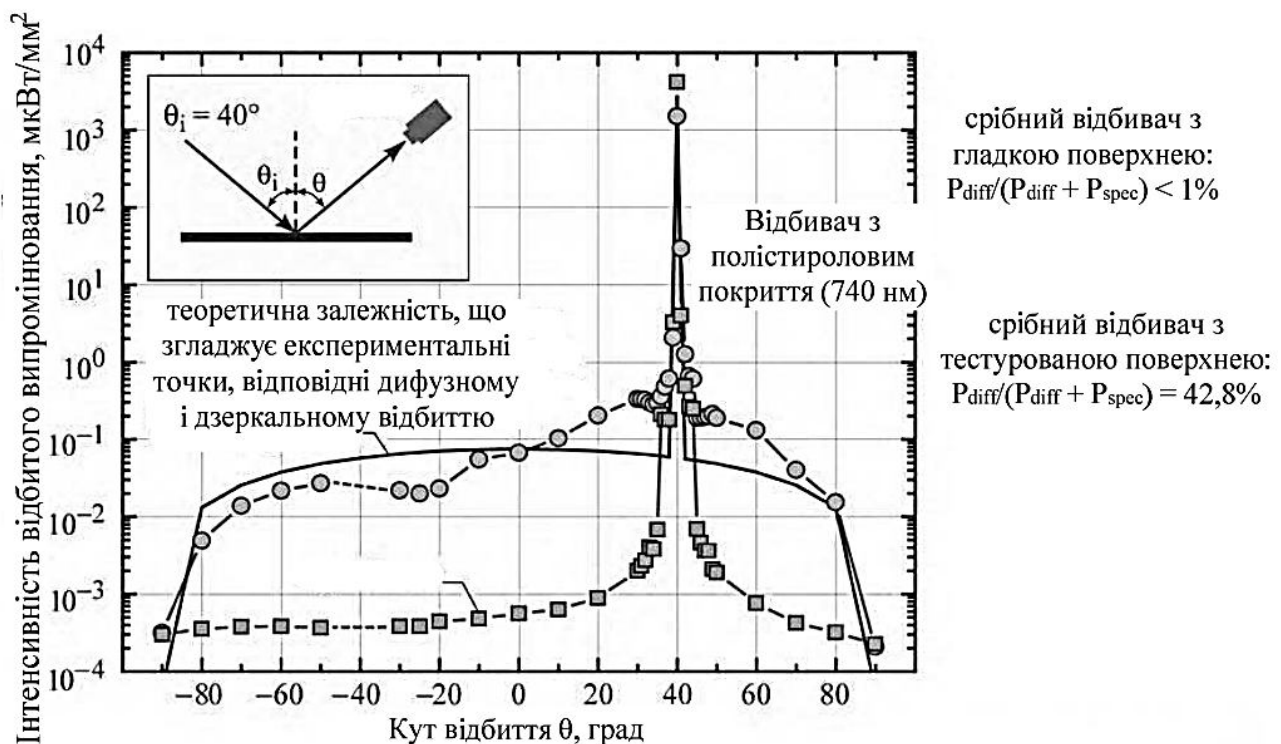


Рисунок 8.12 – Залежності інтенсивності відбитого випромінювання від кута відбиття променів для срібних відбивачів з гладкою й текстурованою поверхнями (Xi et al., 2006)



### 8.3 Застосування відбивачів для світлодіодного освітлення

У склад оптичного блока світлодіодного світильника на відбивачах зазвичай входить джерело світла, відбивачі й захисне скло, яке може бути просто плоским і прозорим, захищаючи оптику від зовнішніх впливів, а за його правильного проектування може бути одночасно частиною оптичної системи.

Для цілей зовнішнього освітлення важливі саме дзеркальні відбивачі, оскільки порівняно з дифузними й матовими їхній ККД значно вище. Форма відбивача може бути різною – від простих дзеркальних вставлень до цільнотягнутої пластини спеціальної форми. Істотною особливістю дзеркальних оптичних систем є можливість достатньо гнучко керувати перерозподілом світлового потоку джерела, створюючи значну його концентрацію в необхідних напрямках. Світильники на світлодіодах складаються із множини точкових випромінювачів, тому керувати світловим потоком у них простіше: більше варіантів геометрії розташування джерел і відбивачів. А чим простіше керування світловим потоком, тим впевніше можна стверджувати про створення економічного освітлювального пристрою.

Сучасні виробники пропонують широкий вибір подібних пристроїв. Зазвичай відбивачі в світлодіодних світильниках застосовують для вузькоспрямованого випромінювання, наприклад у прожекторах (рис. 8.13).



Рисунок 8.13 – Рефлектор на прожекторі

Відбивальні елементи у вуличному освітленні застосовуються значно рідше лінзової оптики. Популярність лінз пояснюється значною зручністю та відносною простотою формування необхідного світлового пучка оскільки

керування випроміненням створюється трьома площинами, двома заломлювальними поверхнями на вході й виході випромінення та однією відбивальною поверхнею в середині лінзи на боковій поверхні, що утворює її. Рефлектори мають лише одну відбивальну поверхню, завдання якої – сформувати необхідний світловий пучок, і частіше застосовуються сумісно зі світлодіодами, які мають випромінювальну поверхню збільшеного розміру або з групою СД.

Застосування відбивачів виключає пряму дію на світлодіоди й тому не впливає на їхній термін служби. Відбивальна здатність кращих матеріалів > 98 %, що дещо вище, ніж при використанні дорогої вторинної оптики.

Отже, розподілення світлового потоку в світлодіодному світильнику може бути одержано виходячи із задачі, за якої проектується світильник. Рефлектори з простим дзеркалом або в комбінації первинного та вторинного дзеркал для світлодіодної групи з рефлекторною системою дають змогу одержати високу ефективність, відсутність видимих точкових джерел світла, кращий розподіл світла, усунення осліплювальної дії, хороше «змішування кольорів». Основні мінуси рефлекторів: чутливість до геометрії, складність у виготовленні 3D дзеркал.

Основні плюси від використання вторинної оптики й готові світлодіодні модулі (друкована плата та мультилінза), одержання будь-якого необхідного світлорозподілу шляхом використання дискретних лінз. Недоліком у лінзовій оптиці порівняно більше, передусім це більш висока ціна, можлива термо- й фоп- деструкція (пожовтіння лінзи), що призводить до значного зниження світлової ефективності.

Також серед недоліків варто виокремити високі механічні напруги в тепловому полі світильника, що може призвести до руйнування лінзи, або зміни розрахованої кривої сили світла.

#### 8.4 Антивідбивальні оптичні покриття

Антивідбивальні AR (просвітлюючі) покриття часто використовують у світлодіодах для систем зв'язку з метою зниження френелівського відбиття на межі розділу напівпровідник-повітря. При нормальному падінні променів на поверхню розділу коефіцієнт відбиття випромінення визначається виразом:

$$R = \frac{(\bar{n}_s - \bar{n}_{air})^2}{(\bar{n}_s + \bar{n}_{air})^2}, \quad (8.7)$$

де  $n_s$  та  $n_{air}$  – показники заломлення напівпровідника та повітря.

Нормальне падіння променів під час використання антивідбиваючого покриття дає змогу зменшити френелівське відбиття на межі напівпровідник-повітря майже до нуля. При цьому покриття повинно мати товщину та показник заломлення:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{(4\bar{n}_{AR})}, \bar{n}_{AR} = \sqrt{\bar{n}_{AR} \cdot \bar{n}_{air}}. \quad (8.8)$$

На рисунку 8.14 продемонстровано антивідбивальне покриття з оптимальними товщиною та показником заломлення, а у таблиці 8.1 наведені показники заломлення та діапазони прозорості декількох типів антивідбивальних покриттів [53].

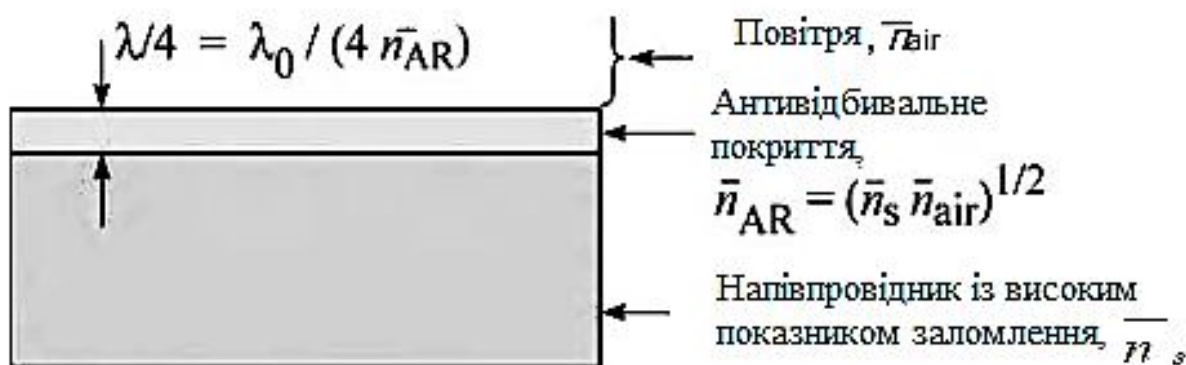


Рисунок 8.14 – Антивідбиваючі покриття з оптимальними товщиною та показником заломлення

Таблиця 8.1 – Показники заломлення та діапазони прозорості деяких діелектриків – антивідбивальних покриттів

Діелектрик	Показник заломлення	Прозорість, мкм
SiO <sub>2</sub>	1,45	>0,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,76	>0,15
TiO <sub>2</sub>	2,50	>0,35
Si <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	2,00	>0,25
ZnS	2,29	>0,34
CaF <sub>2</sub>	1,43	>0,12

## 8.5 Вибір оптичної системи

Розглянемо варіант оптичної системи (світлодіод + відбивач + захисне скло) (рис. 8.15).

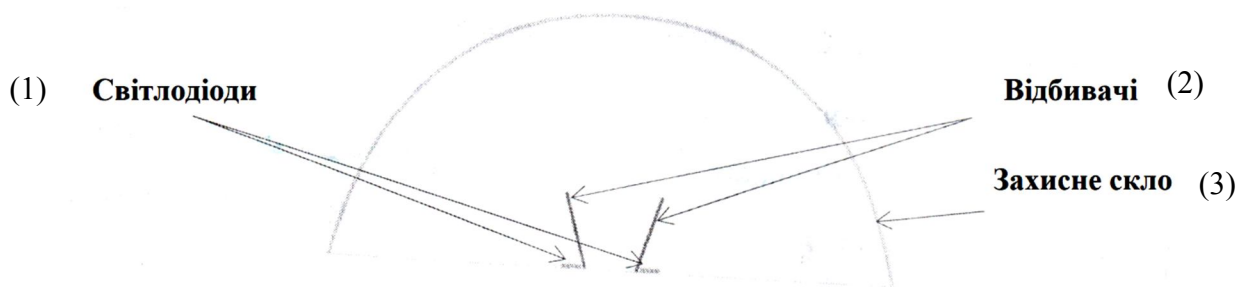


Рисунок 8.15 – Варіант оптичної системи СД в центрі

На рисунку подана оптична система традиційного світлодіодного світильника, яку пропонують більшість виробників. Така оптична система формує широку КСС, яка забезпечує хороші показники рівномірності яскравості.

Відповідно до схеми, система складається із друкованої плати зі світлодіодами (1), відбивачами (2) внутрішніх і зовнішніх, які використовуються для формування необхідної КСС і захисного скла (3). Світлорозподіл цієї системи проілюстрований на рисунку.

Одержаний тип кривої сили світла забезпечує зниження втрат світлового потоку при відбиванні на захисному склі, оскільки в поперечному розрізі світлового приладу світлові промені нормальні до поверхні (рис. 8.16, 8.17).

Дуже важливою проблемою під час конструювання світильників зі світлодіодами є забезпечення необхідного температурного режиму. У технічній літературі зустрічаються різні залежності терміну служби та світлової віддачі від температури, але в середньому можна вважати, що за температури *p-n*-переходу 85 °С світлова віддача знижується приблизно на третину, а термін служби – в два рази.

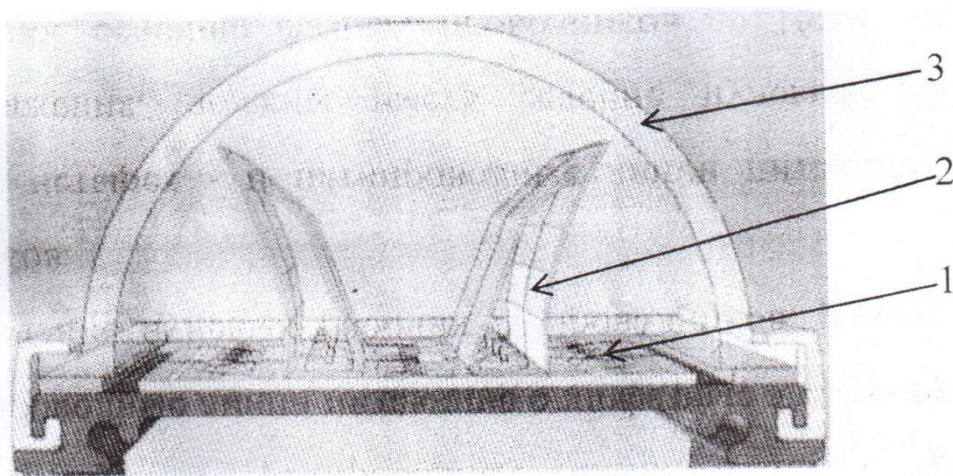


Рисунок 8.16 – Оптична система модульного світлодіода



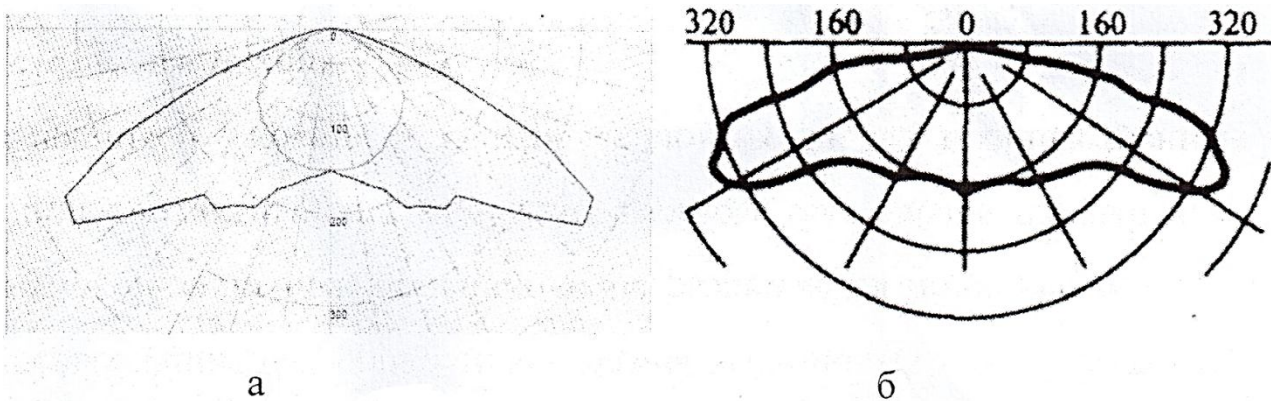


Рисунок 8.17 – Просторовий розподіл сили світла світильника в полярних координатах у головних меридіальних площинах: а – спроектована КСС; б – рекомендована КСС (за ГОСТ 54350-2011)

Деякі автори вважають, що за температури переходу  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$  термін служби зменшується в 10 разів порівняно з терміном служби  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Крім світлової віддачі й терміну служби, від температури переходу залежить і положення домінантної довжини хвилі випромінення та його колірність. Особливо сильно це проявляється в білих світлодіодах із люмінофором, нанесеним безпосередньо на кристал.

Для забезпечення необхідної температури *p-n*-переходу необхідно відводити від світлодіодів тепло, що ними генерується. Для цього використовуються радіатори з великою поверхнею (рис. 8.18). Зараз такі радіатори серійно випускаються багатьма фірмами.

Але щоб радіатори працювали ефективно, необхідно насамперед забезпечити хороший тепловий контакт зі світлодіодами й одночасно електричну ізоляцію між ними.

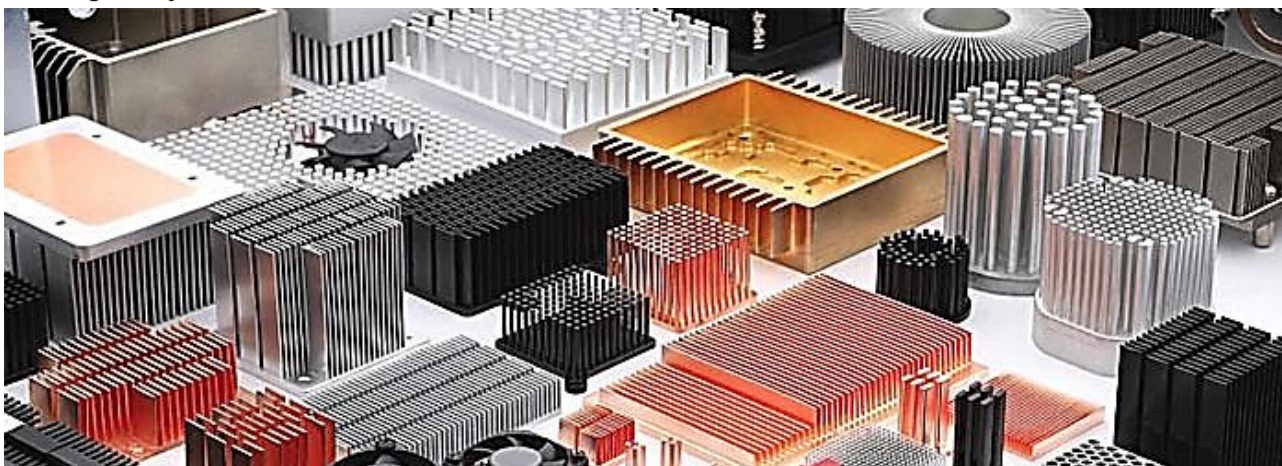


Рисунок 8.18 – Радіатори

Для цього використовуються алюмінієві друковані плати з хорошою теплопровідністю та теплопровідні пасти й мастики. Зараз все більше

розповсюдження одержують керамічні радіатори. Потужні світлодіоди часто виготовляються також в керамічних корпусах. Крім хорошого теплового контакту світлодіода й радіатора, необхідно, щоб тепло від радіатора відводилось назовні, а не залишалось усередині світильника. Тому радіатори



закріплюються на корпусі світильника, який часто також має складну форму з добре розвиненою поверхнею (рис. 8.19).

Відвід тепла від кристала світлодіода відбувається шляхом паяння світлодіодів на друковану плату з алюмінієвою основою та ізолюючим діелектричним шаром, із високою теплопровідністю (вище 1 кВт/мК). Тепло від світлодіодів

Рисунок 8.19 – Задній бік корпусу світильника

розподіляється по всій поверхні алюмінієвої основи плати й далі передається на корпус світильника, при цьому ефективність теплопередачі прямо пропорційна площі плати.

Плата повинна тісно прилягати до поверхні радіатора-корпуса, наприклад, по периметру жорстко скріплюється з корпусом. На поверхні корпусу можуть міститися ребра, які розсіюють тепло шляхом конвекції та випромінення. При цьому висота ребер і частота їх слідування повинні бути підібрані для максимального рівня конвекції без примусового обдування.

Масивний голчасто-ребристий радіатор світлодіодному світильнику зовсім необов'язковий. Світлодіоди не повинні виходити за межі допустимого температурного діапазону, а для цього радіатор повинен мати достатньо обтягнуту площину. Радіатор може бути легким і мати просту форму. А якщо густина виділення потужності невелика, радіатор і зовсім не потрібен – світлодіодний модуль зможе працювати й на друкованій платі та навіть у пластиковому корпусі.

Розвинена площина радіатора корисна тільки за наявності примусової вентиляції.

Конструкція модульного світильника дає змогу вирішити проблему відведення тепла шляхом більш рівномірного розподілу світлодіодів по площині модуля та можливого винесення блока керування живлення світлодіодного модуля на корпус світильника. Це дає змогу знизити температуру корпусу світильника та внаслідок цього підвищити світлову ефективність модуля.



Тепловий опір визначає різницю температур, яка виникає між тепловиділяючим елементом або системою тепловиділяючих елементів (у цьому випадку системою світлодіодів):

$$R_T = \frac{\Delta T}{P_B}, \quad (8.8)$$

де  $\Delta T$  – різниця температур навколишнього середовища і середньої температури радіатора ( $\Delta T = (T_{rad} - T_{сер})$ );

$P_B$  – потужність, що виділяється системою тепловиділяючих елементів.

З іншого боку, тепловий опір при конвективному теплообміні визначається виразом:

$$R_T = 1/(\alpha \cdot S_p), \quad (8.9)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;

$S_p$  – площа теплового обміну радіатора.

Отже, із виразів (8.8) і (8.9) виникає:  $\frac{\Delta T}{P_B} = \frac{1}{(\alpha \cdot S_p)}$ , звідки

$$S_p = \frac{P_B}{(\alpha \cdot \Delta T)}. \quad (8.10)$$

Нехай  $P$  – потужність, яка споживається системою світлодіодів білого випромінювання.

Тоді

$$P = P_B + P_{вин}, \quad (8.11)$$

де  $P_{вин}$  – потужність світлового випромінювання.

Залежно від світлової віддачі  $\eta_c = \frac{\Phi}{P}$ , де  $\Phi$  – світловий потік, випромінюваний системою світлодіодів,  $P$  – потужність.

$$P_B = \left(1 - \frac{\eta_c}{\eta_{теор}}\right) \cdot P, \quad (8.13)$$

де  $\eta_{теор}$  – гранично можлива світлова віддача світлодіода, яка визначається за формулою:

$$\eta_{теор} = \frac{683 \int_0^\alpha \varphi(\lambda) V(\lambda)}{\int_0^\alpha \varphi(\lambda) d\lambda}, \quad (8.12)$$

де  $\varphi(\lambda)$  – спектральна густина випромінювання;

$V(\lambda)$  – функція спектральної світлової ефективності.

Тоді

$$S_p = \left(1 - \frac{\eta_c}{\eta_{теор}}\right) \cdot \frac{P}{(\alpha \cdot \Delta T)}. \quad (8.14)$$

Типове значення  $\Delta T$  не повинно перевищувати 35 °С. За конвекції коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  перебуває в межах від 6 Вт/м<sup>2</sup>К до 10 Вт/м<sup>2</sup>К. Зазвичай при попередніх розрахунках вибирається  $\alpha = 10$  Вт/м<sup>2</sup>К.

Якщо необхідно врахувати потужність, яка виділяється драйвером у разі його розташування всередині корпусу необхідно додати до потужності, яка вживається світловою частиною світильника, величину, рівну  $(1-\eta_{др}) \cdot P$ , де  $\eta_{др}$  – ККД драйвера, рівну 0,9.

Тоді габарити світильника:

$$S_p = \frac{\left[ \left(1 - \frac{\eta_c}{\eta_{теор}}\right) + (1 - \eta_{др}) \right] \cdot P}{\alpha \cdot \Delta T}. \quad (8.15)$$

Оптимізація конструкції корпус-радіатор із точки зору ефективного розсіяння тепла дає змогу збільшити світлову віддачу світильника при тій самій споживаній потужності електричної енергії.

У світлодіодному світильнику найважливішим компонентом після світлодіодів і оптичної системи є джерело живлення, воно також впливає на енергоефективність системи. Саме джерело живлення визначає тривалість роботи світильників.

Пристрої керування живленням повинні забезпечувати не тільки живлення світлодіодів, але й електромагнітну сумісність світильника й мережі, тобто певну форму споживаного струму (відсутність вищих гармонік), відсутність радіозавад, необхідний коефіцієнт потужності. Крім цього, є ще один параметр, пульсації вихідного струму або напруги.

Світлодіоди – практично безінерційні джерела світла, тому випромінюваний ними світловий потік повністю повторює форму струму. Це призводить до пульсацій освітленості на місці, що освітлюється.

Санітарні правила й норми жорстко регламентують глибину пульсацій освітленості. Основоположний документ по нормуванню освітленості в країнах Євросоюзу – норми EN12464-1 «Освітлення робочих місць в середині приміщень». У цьому документі є спеціальний розділ 4, присвячений пульсаціям освітленості. Розділ складається із одного пункту: «В приміщеннях з тривалим перебуванням людей пульсації освітленості не допускаються».

Основні характеристики джерел живлення світлодіодних світильників зі споживаною потужністю 100 Вт і вихідним струмом 350 мА подані в таблиці 8.2. На сьогодні є широкий спектр відомих виробників джерел живлення. У промисловому освітленні хорошо відомі закордонні виробники Mean Well і Invenfronics, Yeson [4-6].

Таблиця 8.2 – Характеристики джерел живлення світлодіодних світильників

Найменування	Виробник	Вихідна потужність, Вт	Вихідний струм, мА	ККД, %	Температурний діапазон, °С	Строк гарантії, час	Діапазон вхідної напруги, В
HVGC-100	Nean Well	100	350	91	-40 °С...+70 °С	5	90...305
EUC-100S035ST	Inventronics	100	350	92	-35 °С...+70 °С	2	90...305
YSSC	Yesok	100	350	90	-40 °С...+70 °С	5	90...264
A220T035C290K	Ирбис	100	350	89	-40 °С...+50 °С	2	170...280
ИПС100-700ТУ	Аргос	100	350	92	-40 °С...+60 °С	3	176...264

Аналізуючи дані таблиці бачимо, що світлодіодний драйвер у середньому має ККД 90 %, це означає, що біля 10% споживаної потужності буде виділятися у вигляді тепла.

## 8.6 Проблеми вибору потужних світлодіодів

Потужний світлодіод для систем освітлення переживає в наш час саме бурхливий період свого розвитку. У розпорядженні розробників є десятки тисяч найменувань світлодіодів і ця кількість тільки зростає. Асортимент однієї тільки компанії CREE в категорії потужних світлодіодів перевищує тисячу найменувань.

Зрозуміло, що за такого широкого асортименту розробники зіткаються з проблемою вибору.

Передусім необхідно зрозуміти, що є критерієм вибору при розробці світлотехнічних виробів на базі світлодіодів.

До необхідних характеристик належать якість, термін служби, технічні параметри та вартість готового виробу. Зрозуміло, що при виборі світлодіода необхідно намагатися забезпечити найкращій набір споживчих характеристик. Це і є критерієм вибору.

Відповідно до цих принципів, передусім необхідно обмежитись тільки тими виробниками потужних світлодіодів, які зарекомендували себе продукцією високої якості.

На наступному етапі вибираються світлодіоди, які задовольняють умовам тривалості терміну служби. Термін служби світлодіодів визначається як час протягом якого інтенсивність світіння падає до 70 % від початкової величини. Відомо, цей час безпосередньо залежить від температури кристала. Тому визначається максимальна допустима температура кристала світлодіода. На

рисунку 8.20 подано графік залежності інтенсивності світла від часу при різних значеннях температури кристала для світлодіодів CREE.

Відповідно до цього графіка, якщо, наприклад, термін служби світлодіода повинен бути не менше 50 тис. год, то робоча температура кристала не повинна перевищувати 90 °С. Відповідно, систему охолодження необхідно розраховувати так, щоб робоча температура кристала для всіх можливих умов експлуатації не перевищувала задану величину.

Тепер необхідно виокремити ті світлодіоди, які забезпечують величину світлового потоку за умови мінімальної вартості. Для цього необхідно в'яснити, які світлодіоди забезпечать мінімальну «вартість світла» (тобто мінімальне співвідношення вартість/люмен).

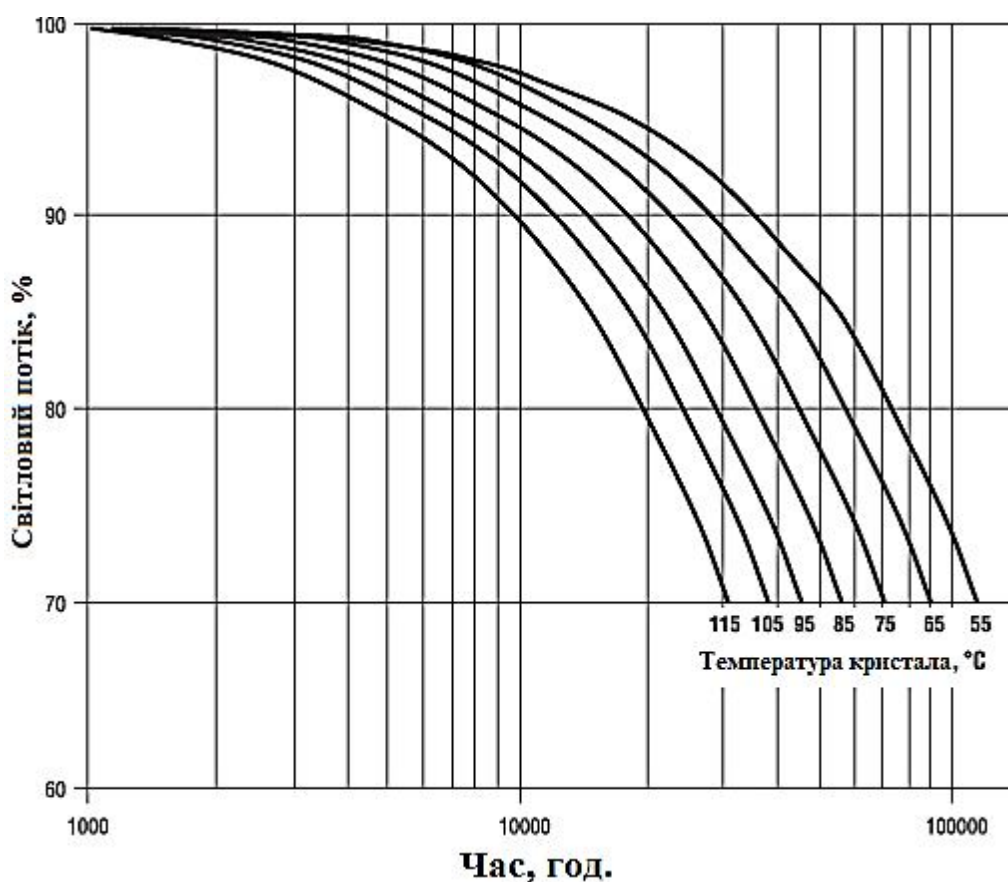


Рисунок 8.20 – Залежність світлового потоку від часу при різних значеннях температури кристалу світлодіодів CREE

Уважаємо, що ми вибрали світлодіоди CREE серій XP-C, XP-E, XP-G, MC-E, MX-G. У цій групі мінімальну вартість (але й мінімальне значення світлового потоку) мають світлодіоди серії XP-C. А найдорожчі в цій групі (але при цьому мають максимальну ефективність) – світлодіод серії XP-G (порівняно з ціною на кристал у випадку 4-кристальних MC-E). Наше завдання в'яснити, який із цих світлодіодів і в якому режимі забезпечить мінімальну

вартість люмена. Виберемо із кожної серії по кілька позицій з максимальними значеннями по світловому потоку й працюючих в одному діапазоні колірних температур. Нехай нас цікавлять світлодіоди холодного білого світіння з інтенсивністю від 80 лм при струмі 350 мА. У таблиці 8.3 перелічені позиції, вибрані нами для дослідження, з умовними цінами.

Таблиця 8.3 – Розподіл світлодіодів за вартістю люмена

Найменування	Світловий потік, лм (при 350 мА і 25 °С)	Ціна, USD
ХРСWHT-L1-0000-00903	80,6	1,5
ХРСWHT-L1-0000-00A03	87,4	1,6
ХРСWHT-L1-0000-00B03	93,9	1,7
ХРСWHT-L1-0000-00C03	100	2,0
ХРЕWHT-L1-0000-00B03	93,9	2,6
ХРЕWHT-L1-0000-00C03	100	2,7
ХРЕWHT-L1-0000-00D03	107	2,8
ХРЕWHT-L1-0000-00E03	114	3,3
ХРGWHT-L1-0000-00E53	114	3,9
ХРGWHT-L1-0000-00F53	122	4,1
ХРGWHT-L1-0000-00G53	130	4,5
ХРGWHT-L1-0000-00H53	139	5,0
МСЕ4WT-A2-0000-000K03	370	9,6
МСЕ4WT-A2-0000-000M03	430	11,9
МХ6AWT-A1-0000-000C53	114	2,1
МХ6AWT-A1-0000-000D53	122	2,3

Згідно з даними в таблиці 8.3, найкраща вартість люмена – у позиції ХРСWHT-L1-0000-00B03 (0,018 1 у. о./лм), а найгірші показники – у світлодіодів серії ХР-G. Але насправді це не так. У таблиці наведено дані тільки для одного значення струму (350 мА) і до того ж – за температури 25 °С. У реальних умовах температура кристала буде набагато вище, що призведе до зниження величини світлового потоку. В разі підвищення струму через світлодіод виросте інтенсивність випромінення, що призведе до поліпшення співвідношення ціна/люмен. Тому ніяких однозначних висновків за цими даними робити не можна. Необхідно провести детальніше дослідження з урахуванням реальної температури кристала та на різних значеннях робочого струму.

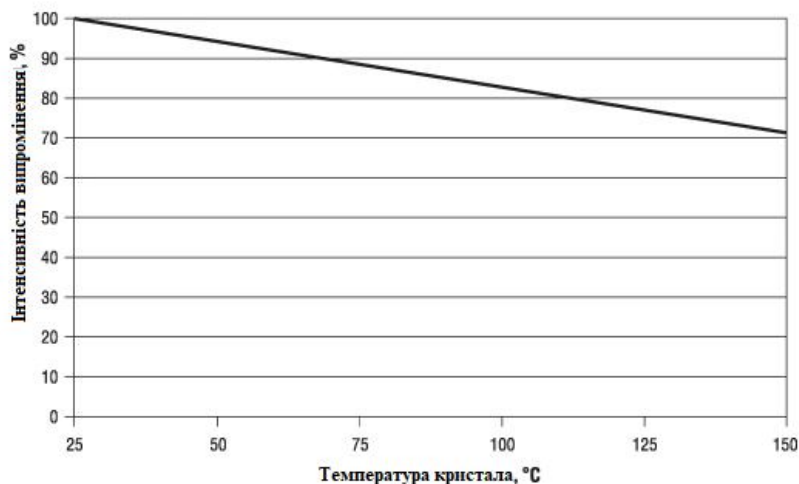


Рисунок 8.21 – Залежність інтенсивності світіння від температури кристала для світлодіодів серії XP-G

гається й для інших світлодіодів CREE білого світіння. Тому можна прийняти для всіх світлодіодів з таблиці 8.4 поправочний коефіцієнт, що враховує

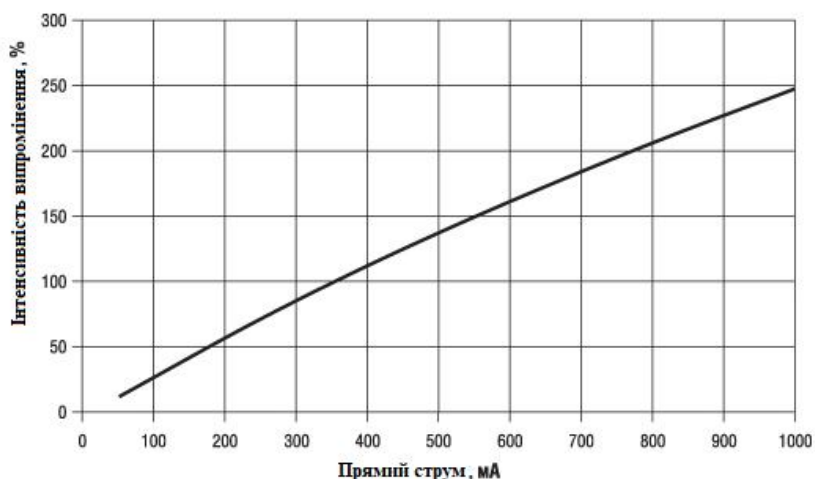


Рисунок 8.22 – Залежність інтенсивності світіння від величини прямого струму для світлодіодів серії XP-G

даних можна розрахувати реальні величини світлового потоку при температурі кристала 90 °C для різних значень струму через світлодіод. Для розрахунків виберемо такі значення струмів – 350, 500, 700 і 1 000 mA. Ці величини є максимальними значеннями струмів для різних серій (наприклад, для XP-G це 1 000 mA, а для MX-6 – 350 mA). Отримані дані зведені в таблицю 8.4.

Задаємо робочу температуру кристала, рівну 90 °C. На рисунку 8.21 поданий графік залежності інтенсивності випромінювання від температури кристала для світлодіодів серії XP-G.

Відповідно до цього графіка, в разі підвищення температури до 90 °C інтенсивність знижується приблизно на 15%. Приблизно таке саме співвідношення спостерігається й для інших світлодіодів CREE білого світіння. Тому можна прийняти для всіх світлодіодів з таблиці 8.4 поправочний коефіцієнт, що враховує температуру кристала рівну 0,85.

Розглянемо, як залежить інтенсивність випромінювання світлодіода від величини прямого струму. На рисунку 8.22 зображена ця залежність для світлодіодів серії XP-G. Як бачимо з цього графіка, при підвищенні прямого струму з 350 mA до 1 000 mA величина світлового потоку збільшується в 2,5 рази.

З урахуванням цих



Таблиця 8.4 – Величини світлового потоку для різних струмів

Найменування	Світловий потік, лм			
	350 мА	500 мА	700 мА	1 000 мА
ХРСWHT-L1-0000-00903	68,5	92,5		
ХРСWHT-L1-0000-00A03	74,3	100,3		
ХРСWHT-L1-0000-00B03	79,8	107,8		
ХРСWHT-L1-0000-00C03	85,0	114,8		
ХРЕWHT-L1-0000-00B03	79,8	107,8	131,7	
ХРЕWHT-L1-0000-00C03	85,0	114,8	140,3	
ХРЕWHT-L1-0000-00D03	91,0	122,8	150,1	
ХРЕWHT-L1-0000-00E03	96,9	130,8	159,9	
ХРGWHT-L1-0000-00E53	96,9	130,8	159,9	242,3
ХРGWHT-L1-0000-00F53	103,7	140,0	171,1	259,3
ХРGWHT-L1-0000-00G53	110,5	149,2	182,3	276,3
ХРGWHT-L1-0000-00H53	118,2	159,5	194,9	295,4
МСЕ4WТ-A2-0000-000K03	314,5	424,6	518,9	
МСЕ4WТ-A2-0000-000M03	365,5	493,4	603,1	
МХ6AWТ-A1-0000-000C53	96,9			
МХ6AWТ-A1-0000-000D53	103,7			

Таблиця 8.5 – Остаточні значення вартості люмена

Найменування	Вартість люмена, USD/лм			
	350 мА	500 мА	700 мА	1000 мА
ХРСWHT-L1-0000-00903	0,0219	0,0162		
ХРСWHT-L1-0000-00A03	0,0215	0,0160		
ХРСWHT-L1-0000-00B03	0,0213	0,0158		
ХРСWHT-L1-0000-00C03	0,0235	0,0174		
ХРЕWHT-L1-0000-00B03	0,0326	0,0241	0,0197	
ХРЕWHT-L1-0000-00C03	0,0318	0,0235	0,0193	
ХРЕWHT-L1-0000-00D03	0,0308	0,0228	0,0187	
ХРЕWHT-L1-0000-00E03	0,0341	0,0252	0,0206	
ХРGWHT-L1-0000-00E53	0,0402	0,0298	0,0244	0,0161
ХРGWHT-L1-0000-00F53	0,0395	0,0293	0,0240	0,0158
ХРGWHT-L1-0000-00G53	0,0407	0,0302	0,0247	0,0163
ХРGWHT-L1-0000-00H53	0,0423	0,0313	0,0256	0,0169
МСЕ4WТ-A2-0000-000K03	0,0305	0,0226	0,0185	
МСЕ4WТ-A2-0000-000M03	0,0326	0,0241	0,0197	
МХ6AWТ-A1-0000-000C53	0,0217			
МХ6AWТ-A1-0000-000D53	0,0222			

Згідно з даними таблиці 8.5, маємо два очевидні лідери за показником «вартість люмена» – ХРСWHT-L1-0000-00B03 на струмі 500 мА і ХРGWHT-L1-0000-00F53 на струмі 1 000 мА. Вибір між ними залежить від того, яку величину світлового потоку повинен мати кінцевий пристрій. Якщо мова йде

про значення в 100-200 лм, то потрібно вибрати XP-C, при великих значеннях краще XP-G. Дійсно, для світильника на 200 лм вигідніше взяти два світлодіоди XP-C по 1,7 USD, ніж один XP-G по 4,1 грн. Але вже для світильника на 250–260 лм ситуація стає прямо протилежною – дешевше використовувати один XP-G замість трьох XP-C.

Зрозуміло, собівартість кінцевого продукту не обмежується вартістю одних тільки світлодіодів. Але, як доводить практика, світлодіод виступає як один із ціноутворюючих елементів, вносячи значний внесок у собівартість всього виробу. Тому використання викладеної вище методики підбору світлодіода за принципом мінімальної «вартості світла» здебільшого буде цілком виправдано й дозволить скоротити собівартість готового виробу в цілому. Перевіримо це твердження на простому прикладі. З таблиці 8.5 бачимо, що два світлодіоди XPGWHT-L1-0000-00F53 на струмі 1 000 мА дають такий самий світловий потік, як один MCE4WT-A2-0000-000K03 на 700 мА. Припустимо також, що в готовому виробі повинна використовуватися вторинна оптика. Тоді в разі MC-E буде потрібно тільки одна лінза, а у варіанті на XP-G – дві. Логічно припустити, що при використанні MC-E можна отримати меншу собівартість за рахунок економії на вартості лінзи. Вартість лінзи можна прийняти за 1,3 грн. Тоді вартість рішення на XP-G буде дорівнює  $2 \times (4,1 + 1,3) = 10,8$  грн., а рішення на MC-E коштуватиме  $9,6 + 1,3 = 10,9$  USD. Тобто рішення на світлодіоді серії XP-G, який забезпечує мінімальну вартість люмена, все ж дає кращий результат.

## **8.7 Методика розрахунку світильника на основі світлодіодів**

На сьогодні ринок виробництва світильників на основі світлодіодів розвивається великими темпами, причиною чого став дійсний прорив у розробці й виробництві напівпровідникових кристалів. Проте часто проектування світильників іде не на зовсім вірному шляху. Тому розглянемо розрахунок освітлювальних систем на базі потужних світлодіодів.

В уставах штучного освітлення норми забезпечують низку якісних і кількісних параметрів. Кількісні параметри нормують значення мінімальної або середньої освітленості й енергоспоживання. До параметрів якості належать показник осліпленості, коефіцієнт пульсації, циліндрична освітленість і показник дискомфорту залежно від типу приміщення.

Метою нормування освітлення є створення світлового середовища, що забезпечує комфортну та безпечну трудову діяльність, безпечне пересування транспорту й пішоходів.

Необхідно визначити з освітлювальними задачами, а саме, яке значення освітленості необхідно досягти на нормуємій поверхні, наприклад офісного стола, підлоги спортивного залу, в складському приміщенні тощо.

Після визначення необхідного рівня освітленості виникає спокуса використання найяскравіших світлодіодів. Проте всі вони мають холодні відтінки, які застосовують далеко не у всіх обласних (особливо в освітлювальних приладах суспільних і житлових будівель) через необхідність забезпечити психофізіологічний комфорт. Це відчуття визивається характеристиками джерела світла – колірною температурою та індексом кольоропередачі. Відповідно до стандартів МКО всі джерела світла поділяться на три групи за колірністю випромінення:

- теплі  $T_u < 3\,000\text{ K}$ ;
- середні (нейтральні)  $T_u = 3\,300\text{--}5\,300\text{ K}$ ;
- холодні  $T_u \geq 5\,300\text{ K}$ .

За ступенем якості кольоропередачі джерела світла класифікуються на чотири групи, із яких за стандартом МКО для застосування в суспільних будівель допускають тільки три:

Ступінь 1 «Відмінно»:

- 1 A  $Ra = 90\text{--}100$ ,
- 1 B  $Ra = 80\text{--}89$ ,

Ступінь 2 «Добре»:

- 2 A  $Ra = 70\text{--}79$ ,
- 2 B  $Ra = 60\text{--}69$ ;

Ступінь 3 «Задовільно»:

- 3  $Ra = 40\text{--}59$ .

Залежність між колірною температурою джерела світла та комфортним рівнем освітленості наведено в номограмі Крюїтгофа на рисунку 8.23.

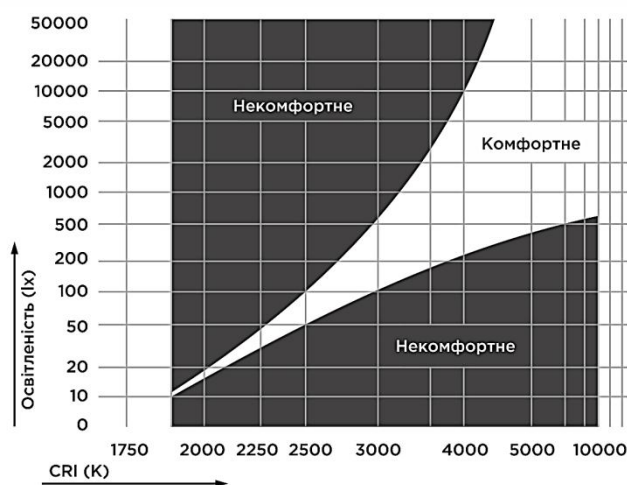


Рисунок 8.23 – Залежність комфортного рівня освітленості від колірної температури

Загалом цією залежністю можна користуватися при виборі колірності світлодіода. При цьому необхідно враховувати колірну обробку приміщення, яка вносить великий внесок в фінальне світлове оточення.

Нехай ми визначились із нормою освітленості, наприклад мінімальна освітленість робочої поверхні офісного столу за європейськими нормами повинна становити 500 лк, а колірна температура – 3 500–5 000 К.

Необхідно визначити, яку кількість світлодіодів потрібно закласти в світильники та в якому режимі вони повинні працювати. Світловий потік необхідної кількості світлодіодів часто прив'язують до світлового потоку ламп, що уже використанні. Цей підхід є неправильним. Перша й основна причина полягає в тому, що світлодіод на відміну від ламп випромінює направлено в одну напівсферу. Для перерозподілу світлового потоку в просторі і збільшенням ККД світильника застосовують рефлектори. Через це ККД освітлювальних установок коливається в значному діапазоні – 30–75 %, унаслідок великих втрат на перевідбиття (рис. 8.24).

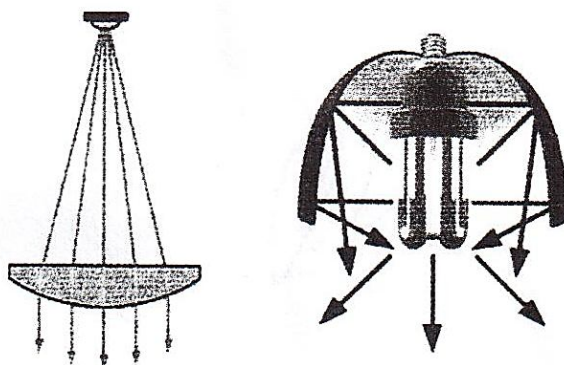


Рисунок 8.24 – Розподіл світла в різних ОУ

Тому необхідно відштовхуватись від забезпечуемого їми значенням освітленості на поверхні або реального світлового потоку та кривої сили світла.

Виберемо світлодіод XP-G нейтрального білого кольору – CREE. Цей світлодіод має: світловий потік 130 лм при 350 мА, світлову віддачу до 124 лм (у холодному білому 131 лм/Вт), робочий струм до 1 000 мА, низьке падіння напруги 3–3,3 В і тепловий опір 6 °С/Вт.

Робоче місце в офісі обмежене робочим столом. Оточення може бути освітлено значно менше (200 лк). Таке локалізоване освітлення дозволяє значно економити електроенергію. Зазвичай, робоче місце вкладається в прями діаметром 2 метри. Кут випромінювання світлодіода XP-G становить 125°, за якого світловий пучок із відстані 2 метри має діаметр близько 8 метрів, що, безумовно, є дуже великим значенням, за якого створюється рівномірне освітлення, не вигідно ні з енергетичної, ні з економічної точки зору. Для

трансформації світлового пучка необхідно застосувати вторинну оптику, яка створить на рівні робочої поверхні 0,7–0,8 метрів від підлоги при висоті стелі 3 метри світлову пляму діаметром 2 метри й дозволить зменшити загальну кількість СД. Наприклад, лінзи виробництва фінської компанії Ledil із круглим (LXP-C) або квадратним (XP-G) профілем із кутом половинної яскравості 41° (рис. 8.25) добре виконають цю задачу.

Середню освітленість на поверхні можна визначити як відношення падаючого потоку на поверхню, до її площі звідкіля необхідний світловий потік є добутком середньої освітленості поверхні та її площі.

$$\Phi = E_{cp} \cdot A = E_{cp} \pi \left[ h \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha}{2} \right) \right]^2, \quad (8.17)$$

де  $h$  – відстань від робочої поверхні до висоти установки світильника,  
 $\alpha$  – кут половинної яскравості вторинної оптики.

Підставивши в формулу приведені раніше дані, одержимо значення світлового потоку, що приходить на робочу поверхню, близько 1 500 лм.

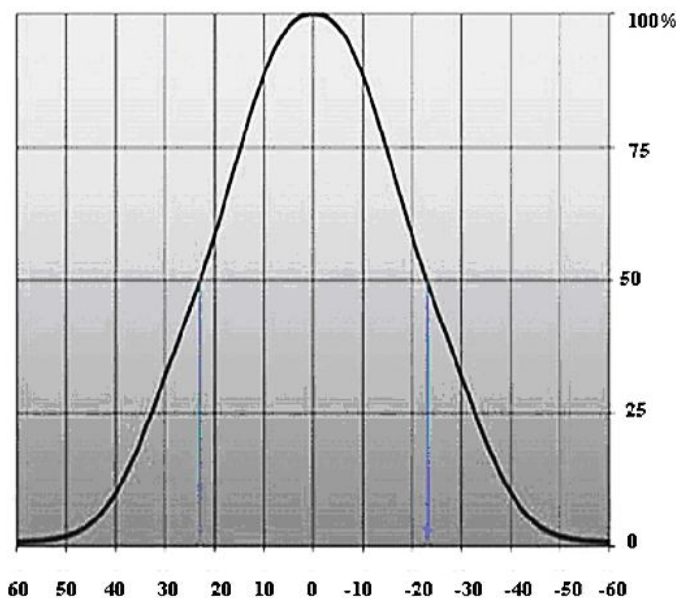


Рисунок 8.25 – Розподіл інтенсивності лінзи CXР-W-EA 10708 Ledil

Щоб привести цю величину до необхідної кількості світлодіодів, необхідно враховувати декілька факторів, а саме:

- нелінійну залежність світлового потоку СД від прямого струму;
- падіння світлового потоку СД зі зростанням температури;
- поглинання й розсіяння вторинною оптикою.

Виберемо робочу точку світлодіода XP-G на рівні 700 мА, що становить 70 % від максимального робочого значення. У такому режимі світлодіод буде

працювати в двоватному режимі (точніше, 2,24 Вт), а світловий потік одного світлодіода досягає 24 лм. Ці значення дійсні при температурі 25 °С, що при експлуатації в режимних умовах недосяжні. Світлодіод при проходженні через нього електричного струму буде нагріватися за допомогою внутрішнього опору і потребує охолодження для нормальної роботи. Виробники регламентують різну максимальну робочу температуру *p-n*-переходу (переважно 125 °С–150 °С). Вибір робочої температури припускає комплексні рішення між більш низькою температурою, а значить зі збільшеннями світловіддачею та терміном служби й витратами на охолодження. Зважаючи на типову залежність терміна служби потужних світлодіодів бачимо, що регламентуємий термін служби 50 тис. год при падінні світлового потоку на 30 % досягається за температури 90 °С. За цієї температури світловий потік у наслідок нагріву кристала знизиться на 14,5 % і становитиме 206 лм. Наприклад, при температурі переходу 110 °С падіння світлового потоку відносно 25 °С становитиме 19,19 і його величина буде 155 лм.

Наступний елемент, що безпосередньо впливає на світловий потік світильника – вторинна оптика. Для її виробництва використовується поліметилметакрилат, а виробник регламентує пропускання оптики на рівні 90 %, тому застосування лінз для формування необхідної плями розсіяння знизить світловий потік світлодіода до 185 лм.

Ураховуючи ці фактори, а також те, що в куті половинної яскравості 46° за рівнем 0,5 лінзи СХР-W-EA 10708 Ledil (див. рис. 8.25) заключено близько 70 % всього світлового потоку світлодіода (здебільшого залежить від оптики), можна обчислити кількість СД, необхідних для створення на робочій поверхні освітленості на рівні 500 лк. Решта 30 % забезпечить освітлення оточуючого середовища простору.

Отже, для нашої задачі достатньо 12 світлодіодів ХР-G, які випромінюють світловий потік 185 лм із врахуванням усіх послабляючих факторів. Ці світлодіоди працюють на струмі 700 мА при температурі *p-n*-переходу 90° у комплекті із вторинною оптикою Ledil СХР-W-EA 10708 забезпечуючий кут половинної яскравості 46°. Споживана потужність такого світильника становитиме 27 Вт. Вона збільшиться на 10–40 % залежно від використовуваного джерела живлення, ККД якого різниться в широких межах. Його вибору потрібно приділяти велику увагу, оскільки джерело струму з високим значенням ККД забезпечить енергоекономічність вибору, а не призведе всі переваги світлодіодного освітлення до нуля.

Підтримку заданої робочої температури переходу потрібно забезпечити радіатором, який зможе ефективно відводити тепло, що виділяється



світлодіодами при температурі навколишнього середовища 30–35 °С. Вже задавшись граничною температурою  $p$ - $n$ -переходу, за формулою

$$T_{p-n} = T_a + R_{Tp} \cdot P_{\Sigma} (1 - \eta) + (R_{TLED} + R_n) \cdot P_{LED} \cdot (1 - \eta) \quad (8.18)$$

отримуємо вираз для значення теплового опору радіатора:

$$R_{Tp} = T_{p-n} - T_a - (R_{TLED} + R_n) P_{LED} \cdot (1 - \eta) / P_{\Sigma} \cdot (1 - \eta), \quad (8.19)$$

де  $T_{p-n}$  – вибрана температура  $p$ - $n$ -переходу;

$T_a$  – розрахункова робоча температура навколишнього середовища;

$R_{TLED}$  – тепловий опір СД ;

$R_n$  – тепловий опір переходу «друкована плата – радіатор, зазвичай становить 0,2–0,5 °С/Вт;

$P_{LED}$  – потужність, що надходить до СД і визначається як  $P_{LED} = U \cdot I$ ;

$\eta$  – ККД СД.

На сьогодні в типових номенклатурних одиницях він вже практично наблизився до 45 %. При температурі переходу 90 %, ККД знизиться тому для розрахунку з запасом візьмемо  $\eta = 0,25$ ;  $P_{\Sigma}$  – сумарна потужність, яка визначається за формулою:

$$P_{\Sigma} = U \cdot I \cdot n, \quad (8.20)$$

де  $n$  – кількість СД.

Підставивши приведені вище дані, одержимо розрахункове значення теплового опору радіатора близько 2 °С/Вт.

## 8.8 Взаємозв'язок вхідних і вихідних параметрів світлодіодної системи

При проектуванні світлодіодних пристроїв перед розробниками завжди стоять питання ефективності роботи пристрою з точки зору співвідношення різних параметрів. Наприклад можна мати на меті досягнення найбільшого світлового потоку за ту саму вартість або наголошувати на досягненні надійності й тривалості терміну служби тощо. При цьому, зазвичай, поліпшення одного показника призводить до погіршення іншого та в деякому сенсі, розробнику пристроїв приходиться «розмінювати» одні параметри на інші. Так, на приведеній схемі (рис. 8.26) показаний комплексний взаємозв'язок параметрів світлодіодної системи одного з одним. Очевидно, що підвищення струму через світлодіод приводить до зростання його світлового потоку, що зі свого боку, приводить до зменшення початкової вартості люмена світла. Проте

підвищення струму приводить до збільшення розсіяної потужності і, відповідно, до збільшення температури.

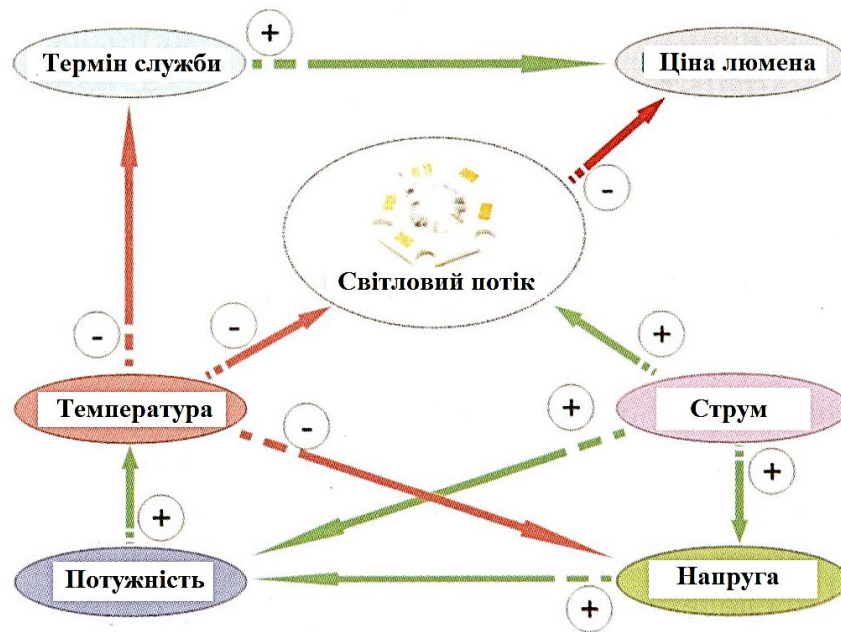


Рисунок 8.26 – Взаємозв’язок параметрів світлодіодних систем

Збільшення температури, зі свого боку, призводить до зменшення світлового потоку (це одна із причин, за якої світловий потік зі зростанням струму зростає повільніше і, зрештою, припиняє зростання й починає падати). Також зростання температури скорочує термін служби світлодіодів і, отже, призводить до збільшення кінцевої вартості люмена.

## 8.9 Термін служби світлодіодів

Світлодіоди, зазвичай, не виходять із ладу катастрофічно (не перегорають як, наприклад, лампи розжарення), тому термін їхньої служби визначають за зменшенням світлового потоку до деякої величини від початкового значення. Зазвичай ця величина становить 70 % або 50 % (відповідно вводять позначення для терміну служби: L70 або L50). За різними оцінками цей термін становить близько 50 тисяч годин.

Водночас для системи, яка складається із багатьох СД, величина  $L_{XX}$  має сенс деякого середнього значення. У світлодіодній системі завжди є світлодіоди, потік від яких зменшиться більше або менше встановленого порогу, тому вводять допоміжну метрику, термін служби.  $B_{XX}$  – кількість світлодіодів (у відсотках), потік яких впаде нижче порогу, що визначається  $L_{XX}$ . Наприклад,  $B_{10}/L_{70}$  – час після якого світловий потік 10 % світлодіодів впаде нижче 70 % від початкового потоку.

На жаль, на сьогодні немає однозначного методу вимірювання терміну служби світлодіодів. Пов'язано це з тим, що оціночні величини в 50 тисяч годин відповідають 5–6 рокам безперервної роботи світлодіода. За цей час прогрес істотно крокує вперед і світлодіоди, для яких одержанні ці дані, застаріють, як морально, так і технічно, і одержані дані стають неактуальними.

Існує стандарт IESNA LM-80-08, який визначає методику вимірювання терміну збереження світлового потоку світлодіодів (або вимірювання часу деградації). Цей стандарт розповсюджується тільки на світлодіодні матриці й модулі, і встановлюють стандартні умови для вимірювання часу деградації за різних умов. У 2011 році був опублікований технічний меморандум IESNA TM-21-11, який визначає методику екстраполяції результатів вимірювання, одержаних у відповідності з LM-80, за межі інтервалу вимірювань.

Отже, стандарти LM-80 і TM-21 представляють собою індустріальні стандарти для вимірювання та прогнозування терміну збереженості світлового потоку світлодіодів. Для вимірювання світлового потоку готових світлодіодних систем освітлення застосовується стандарт IESNA LM-79, який визначає методику й умови вимірювання спектральних, колірних, енергетичних і фотометричних характеристик.

## 9 ФОТОМЕТРІЯ СВІТЛОДІОДІВ

### 9.1 Характеристики світлодіодів

Якість світлодіодів найкраще характеризується їхньою здатністю до перетворення електричної енергії в світлову в межах робочих густин струму. На рисунку 9.1 наведені результати, які одержані на світлодіодах із матеріалів, що мають практичне значення.

Криві являють собою залежність світлового потоку, випромінюваного з одиниці площі переходу, від вхідної потужності, приведеної до одиниці площі. Така залежність є найраціональнішим способом описування якості світлодіодів, як із прямими, так і непрямыми міжзонними переходами. Для прямозонних напівпровідників (наприклад для арсеніду галію) площа переходу приблизно еквівалентна площі поверхні, яка випромінює світло. Якщо вважати випромінюючу поверхню ламбертівською, то вихідний світловий потік, випромінюваний одиницею площі переходу (рис. 9.1), пропорційний яскравості  $L_v$ . Для непрямоzonних напівпровідників (таких як фосфід галію), а також у тих випадках, коли площа світлодіода перевищує площу  $p$ - $n$ -переходу, яскравість обернено пропорційна освітленій площі (це не означає, проте, зниження видимості; навпаки оптимальна видимість досягається шляхом компромісного вибору площі випромінюючої поверхні та яскравості). За таких умов для світлодіодів, розміри яких перевищують площу випромінюючого переходу, основним показником є не яскравість, а світловий потік. Проте світловий потік доцільно нормувати на площу випромінюючого світла переходу, оскільки із економічних міркувань кількість використовуваного напівпровідникового матеріалу має бути мінімальною.

Кожна точка на кривих, наведених на рисунку 9.1, характеризує світлову віддачу за потужністю  $\varepsilon_p = \frac{1}{P}$ , де  $P$  – електрична потужність, яка розсіюється у світлодіодів у робочому режимі при прямому зміщенні. Другою широко застосовуваною величиною є світлова віддача за струмом  $\varepsilon_i$ , у якій світловий потік належить не до одиниці вхідної потужності, а до одиниці прямого струму. Для проектувальників ці величини мають найбільшу цінність, якщо вони даються у вигляді робочих характеристик. Будь-які застосування світлодіодів (СД) потребують знання їхніх параметрів. При цьому виникають певні труднощі, пов'язані з відмінністю величин, одиниць і способів вимірювання. Порівняно з тепловими джерелами світла СД мають дуже малі розміри та потужність не більше 10 Вт. Для них потребується живлення тільки постійним струмом з дотриманням полярності та із напругою від 1 В до 10 В. Випромінювання СД може модулюватися з великою частотою та в широкому

діапазоні лінійно змінюватися з величиною струму живлення без істотної зміни колірності.

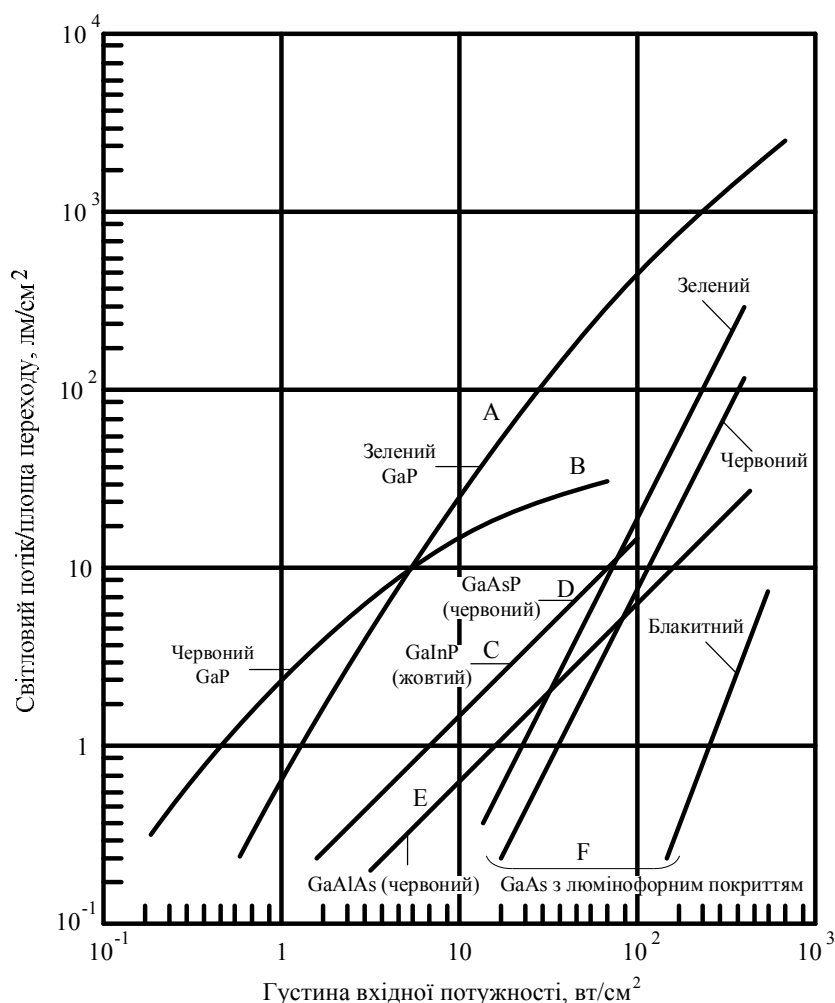


Рисунок 9.1 – Залежність світлового потоку, випромінюваного з одиниці площі переходу, від вхідної потужності, приведенної до одиниці площі

Низька напруга живлення, малі розміри, великий термін служби та «холодне» світло з широкою колірною гамою забезпечили масове використання СД як індикаторних елементів, які керуються безпосередньо від сучасної електроніки, особливо у приладах із живленням від батарейок. У багатьох галузях застосування СД і ІЧ діодів (фотореле, пристрої оптичного зв'язку, телекерування, волоконно-оптичний зв'язок) використовуються саме ці їхні властивості.

Напівпровідникові матеріали СД мають дуже високі коефіцієнти заломлення (до 3,5), завдяки чому повне внутрішнє відбиття відбувається вже при малих кутах, що значно перешкоджає виходу випромінювання.

Корпус із прозорої епоксидної смоли з коефіцієнтом заломлення близько 1,5 послаблює це явище й дає змогу, крім того, використовувати корпус як лінзу та за її допомогою формувати необхідний просторовий розподіл

світлового пучка від дуже вузького (з кутом випромінювання менше  $3^\circ$ ) до майже дифузного з рівномірним розподілом потоку в напівсфері.

Термін роботи СД значно більше 10 000 г і мало залежить від невеликих перевантажень напруги, робочого розташування або механічних впливів. У цьому плані СД значно перевищують лампи розжарювання, особливо при використанні їх на рухливих об'єктах, зокрема й в автомобілях із їхнім широким діапазоном робочих температур.

Інша група «звичайних» джерел світла включає всі газорозрядні лампи високого й низького тиску. У спектрі випромінювання газорозрядних ламп низького тиску присутні лінії, типові для наповнювального газу. Такі джерела світла використовуються, насамперед, як колірні трубки, які світяться, («неонові»), особливо для реклами. Крім того, вони довгий час використовувались як малопотужні сигнальні лампи. У більшості газорозрядних лампах низького тиску є невелика кількість ртуті, висока напруга запалювання, завжди небезпечні для людей.

Конкуренцію люмінесцентним лампам можуть скласти СД-модулі, які зараз активно розроблюються. Просте керування триколірними модулями забезпечує можливість змінювати не тільки освітленість робочих місць, але й колірність випромінювання.

### 9.1.1 Електричні та теплові характеристики світлодіодів

СД, зазвичай, працюють на постійному струмі стабільної величини  $I_F$ , який протікає у прямому напрямку, зв'язаному з певною напругою (прямою напругою)  $U_F$ , що вимірюється через контакти СД. Для точних вимірювань рекомендуються окремі контакти для живлення струмом СД і для того, щоб вимірювати напругу (чотирьохполюсні колодки). Вони є необхідними для режиму з більш високими струмами, які типові для одиночного або множинного режимів. Електрична потужність  $P$ , яку споживає СД, обчислюється як

$$P = U_F \cdot I_F. \quad (9.1)$$

При низьких струмах потужність випромінювання (світловий потік) зростає швидше, ніж електрична потужність (пускова амплітуда). При високих струмах нахил стає більш плоским (площа насичення), який здебільшого спричинений нагріванням чипа СД. За нормальних робочих умов (між пусковою амплітудою та площею насичення) оптичне випромінювання емітоване СД, лінійно корельоване з електричним струмом. Отже, робота в режимі постійного струму рекомендується для вимірювань, які дають можливість для визначення характеристик СД.



У багатьох традиційних джерелах світла знайдена сильна кореляція між випромінюваним світловим потоком і споживаною електричною потужністю. У СД це не так. При постійному струмі пряма напруга СД зменшується зі збільшенням температури оточуючого середовища. Регулювання електричних робочих умов тільки для того, щоб стабілізувати споживану СД потужність, змінює температуру кристала і, отже, впливає на падіння напруги на СД. Тому тільки стабілізація електричної потужності не рекомендується як засіб для підвищення стійкості вихідного випромінювання СД.

Оптичні параметри СД залежать від величини струму й від температури випромінюючого кристала, тому умови експлуатації мають чітко обумовлюватися в технічній документації та суворо дотримуватись.

Незалежно від сфери застосування СД, еталонні зразки СД повинні працювати при живленні їх регульованим постійним струмом, який нагріває кристал.

Позначимо через  $U_f'$  падіння напруги на окремому кристалі СД при номінальній температурі навколишнього середовища й при номінальному струмі  $I_f$ . Тоді кожна зміна температури  $\Delta T_a$  призведе до зміни напруги з відносним температурним коефіцієнтом  $\alpha_u$  і відповідного підвищення температури завдяки збільшенню електричної потужності, яка відводиться від кристала через тепловий опір  $W$ :

$$U_f = U_f' [1 + \alpha_u (\Delta T_a + W \cdot U_f' \cdot I_f)]. \quad (9.2)$$

Спеціально виготовлені робочі еталонні СД-випромінювачі разом з нагрівальними елементами змонтовані в металічних корпусах з вікном, при цьому між корпусами та кристалами забезпечується хороший тепловий контакт (рис. 9.2).

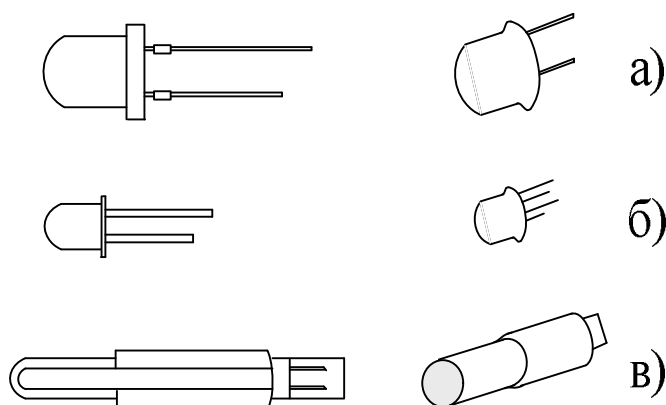


Рисунок 9.2 – Форма корпусів світлодіодів:

а – звичайний корпус; б – особливе виконання для еталонного зразка з кристалом і допоміжним нагрівачем на загальній основі; в – вбудований в адаптер із внутрішнім нагрівальним елементом

Завдяки цьому скорочується час досягнення термодинамічної рівноваги, а допоміжне нагрівання дає змогу активно регулювати температуру кристала та встановлювати її при необхідності вище температури власного нагрівання кристала. При масовому виробництві СД кристали, зазвичай, заливають епоксидною смолою, яка перешкоджає відведенню тепла, і тому вони практично термоізолювані від навколишнього середовища. Нагрівний елемент у цьому разі може бути тільки зовнішнім і передавати тепло через виведення СД, які мають кращий тепловий контакт із кристалами. Пряме падіння напруги на кристалі залежить від матеріалу напівпровідника, проте воно завжди достатньо сильно змінюється як давач для електронних регуляторів режиму. За допомогою зовнішніх нагрівних елементів можна підтримувати температуру кристала на заданому рівні й у такий спосіб стабілізувати випромінюваний світловий або променевий потік і спектральний розподіл випромінювання.

### 9.1.2 Геометричні параметри світлодіодів

Вимірювання параметрів СД має проводитись з урахуванням їхніх розмірів, просторового, кутового та поверхневого розподілу випромінювання й інших характеристик. Для спрощення будемо в подальшому говорити про найбільш масову форму корпусу СД у вигляді циліндра із прозорої епоксидної смоли з невеликою косинусністю та з діаметром 5 мм (рис. 9.2).

Якщо матеріал корпусу каламутний, то СД випромінює в широкому куті (дифузне випромінювання). Прозорі корпуси-лінзи, навпаки, формують випромінюваний потік у малих тілесних кутах. У подальшому ми будемо говорити про фотометричні величини, але сказане повністю належить і до енергетичних характеристик.

Для СД із дифузним характером випромінювання достатньо лише приблизно витримувати положення відносно оптичної осі, оскільки градієнт просторового розподілу випромінювання малий і невеликі відхилення не внесуть помітних похибок у результати вимірювання.

Там, де від СД потребується максимальна сила світла, навіть невелике відхилення від оптичної осі значно знижує точність вимірювання. Це можна продемонструвати на простій моделі колосиметричного розподілу сили світла довкола оптичної осі  $I_{\theta}$ , яка з точністю, достатньою для стандартних вимірювань, може бути апроксимована косинусною функцією:

$$I(\theta) = I_0 \cos^{g-1} \theta;$$

$$U_{\text{від}}(\cos^{g-1}) = \frac{(g-1)\theta^2}{\sqrt{2\theta}}, \quad (9.3)$$

де  $I_0$  – сила світла в напрямку оптичної осі;

$\Theta$  – половинний кут розсіювання;

$g$  – показник апроксимуючої експоненти.

За дифузного просторового розподілу випромінювання  $g = 2$  кут розсіювання на рівні відносної сили випромінювання 0,5 становить  $60^\circ$  і відхилення від оптичної осі на  $1^\circ$  вносить відносну похибку не більше 0,01 %. Якщо ж просторовий розподіл характеризується малим кутом (близько  $5^\circ$ ), то показник експоненти  $g$  дорівнюватиме 200. Відхилення оптичної осі на  $1^\circ$  призведе при цьому до відносної похибки приблизно 1 %.

Через технологічних причин циліндрична частина корпусу СД має невелику конусність, тому точний затиск СД неможливий. Струмоводи СД також не придатні для точної установки, оскільки вони легко можуть згинатися. Нарешті, площина основи може бути нерівною й тому також не придатна для точної установки. Ці недоліки призводять до похибок вимірювань, які можуть бути допустимі при заводському контролі готової продукції, але зовсім неприйнятні при калібруванні еталонних зразків робочих еталонів. Для того щоб забезпечити високу відтворюваність вимірювань сили світла СД, були розроблені спеціальні адаптери, в які СД вклеюються після попереднього юстування (рис. 9.3).

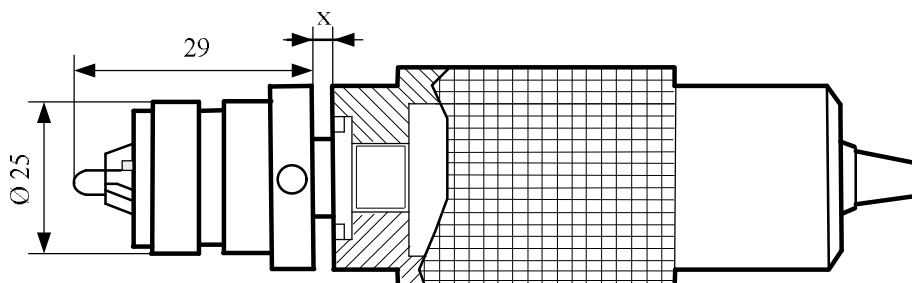


Рисунок 9.3 – Прецизійний випробувальний адаптер для 5 мм СД

Рисунок 9.3 демонструє прецизійний випробувальний патрон для 5 мм СД. Три затискачі завжди тримають СД модуль у тій самій точці і, отже, це дозволяє ідентичне центрування механічної вісі для всіх СД із тим самим корпусом.

Цей пристрій відповідає рекомендації МКО, що механічні осі СД, більшою мірою ніж оптичні осі, необхідно брати як базові для вимірювань [1].

### 9.1.3 Вимірювання оптичних параметрів світлодіодів. Фотометричні характеристики СД

Одиночні СД характеризуються величинами сили світла та світлового потоку; СД-модулі – яскравістю. Для характеристики джерел світла необхідно також знати обмеження блискості й контраст. Якщо світлодіоди застосовуються не для освітлення, то необхідно знати силу випромінювання (Вт/ср), енергетичний потік (Вт) і енергетичну яскравість (Вт/ср·м<sup>2</sup>), а також опроміненість (Вт/м<sup>2</sup>).

На вимірювальному стенді з використанням гоніометра сила світла та світловий потік СД вимірюється практично одночасно. Повний світловий потік розраховується шляхом інтегрування просторового розподілу сили світла в кутах  $0 \leq \phi \leq 2\pi$  і  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ .

Спосіб вимірювання у фотометричному шарі

Фотометричні величини, наприклад, світловий потік, можна визначити з радіометричної величини  $\Phi_e$  шляхом перерахунку з урахуванням спектральної чутливості ока  $K(\lambda) = K_{max}(K_{max})$ .

При цьому коефіцієнт перерахунку буде мати своє значення для кожного

спектрального розподілу випромінювання

$$\frac{\Phi_v}{\Phi_e} = K_m \frac{\int S(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int S(\lambda)d\lambda}. \quad (9.4)$$

Проте загальний коефіцієнт перерахунку між фотометричними й радіометричними величинами відсутній.

Для характеристики колориметричних параметрів СД застосовується координати колірності (x, y). Для колірних СД можна використовувати також поняття «домінантна довжина хвилі» і «чистота кольору», які дають змогу

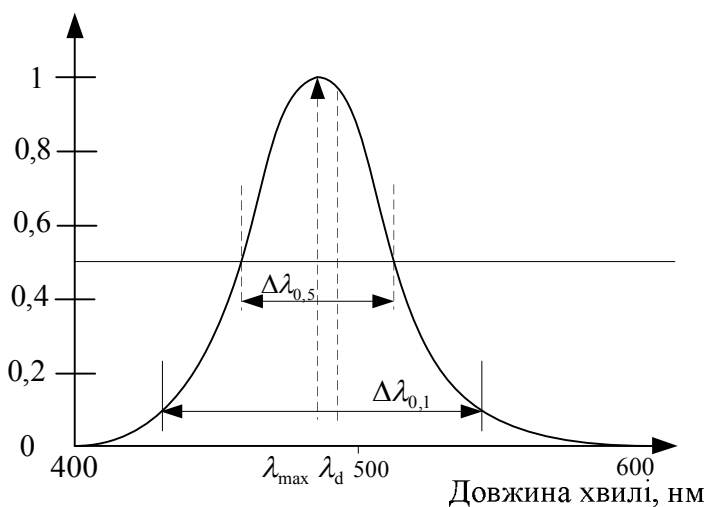


Рисунок 9.4 – Типовий спектральний розподіл енергії випромінювання СД

порівнювати їхні випромінювання з монохроматичним. Для «білих» СД застосовується корельована колірна температура, яка також дозволяє проводити оцінку колірності випромінювання, але тепер порівняно не з монохроматичним, а з «абсолютним» випромінювачем із такою самою температурою. Якість освітлення білими СД оцінюється також загальним

індексом кольоропередачі  $R_a$  і ступенем зміни кольору предметів при освітленні їх селективним світлом.

Спектрорадіометричні параметри СД виражаються кривими спектрального розподілу випромінення, домінантною довжиною хвилі та напівшириною спектральної смуги, як це показано для конкретного зразка (рис. 9.4). Користувачі СД часто шукають методи перерахунку між домінантною і «максимальною» довжиною хвилі та між корельованою колірною температурою та спектральним розподілом випромінення ламп розжарення при такій температурі. Загальне перерахування тут неможливе, оскільки колориметричні величини також пов'язані з функціями спектрального розподілу випромінення.

#### 9.1.4 Вимірювання сили світла (сили випромінення)

Фотометричний закон віддаленості стверджує, що сила світла може бути обчислена за освітленістю, якщо відстань фотометрування більше, ніж фотометрична межа, а формула Фауста показує, що для досягнення точності в 1 % фотометрування необхідно проводити на відстані, яка в 10 разів перевищує максимальний розмір джерела або приймача випромінювання.

При вимірюванні середньої освітленості  $E$  плоским круговим приймачем від джерела світла з силою світла в напрямку оптичної осі  $I_0$  і тілесним кутом  $\Omega_0$  фотометричний закон віддаленості має бути розширений і записаний так:

$$E = \frac{I_0 \Omega_0}{d^2} \left\{ 1 + \frac{g+2}{4} \left( \frac{r_d}{d} \right)^2 - \left( \frac{r_{cd}}{d} \right)^2 + O(3) \right\}. \quad (9.5)$$

Член  $O(3)$  у цьому рівнянні вносить поправки третього порядку й вище і, зазвичай, нехтує малим.

Для СД діаметром 5 мм із дифузним світлорозподілом (тобто  $g = 2$ ) і приймача випромінювання площею 100 мм<sup>2</sup> (відповідно  $2r_d = 11,28$  мм) похибка при вимірюванні сили світла з відстані  $d = 100$  мм становить 0,4 %. За тих самих умов похибка у вимірюванні сили світла СД з  $2\theta_{0,5} = 5^\circ$  (тобто при  $g = 200$ ) досягає вже 16 %. Аналіз показує, що розміри СД при цьому мало впливають на точність вимірювань, а вирішальним є малий кут випромінювання. Для СД з малими кутами випромінювання не допомагає й пошук «центра тяжіння» світлового пучка шляхом зміни відстані фотометрування, щоб потім можна було застосувати закон віддаленості без коригування.

Виробники мають характеризувати всі СД, що випускаються, за єдиною методикою. Тому МКО розробило й рекомендувало правила вимірювання сили світла СД [1]. Колосиметричні корпуси СД при вимірюваннях мають

встановлюватися так, щоб оптична вісь була направлена в центр приймача випромінювання перпендикулярно його поверхні. Поверхня приймача має бути круглою з площиною  $1 \text{ см}^2$  і мати рівномірну чутливість по всій площині; відстань від «верхівки» СД до апертурної бленди приймача має становити для СД типу «А»  $d_A = 316 \text{ мм}$  і для СД типу «В» –  $d = 100 \text{ мм}$  (рис. 9.5).

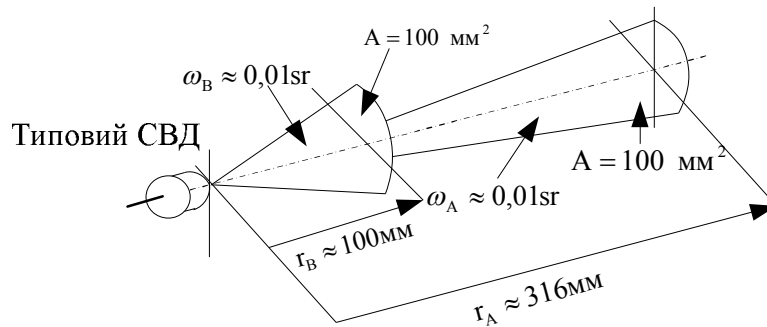


Рисунок 9.5 – Рекомендована МКО геометрія «А» вимірювань усередненої сили світла

Для прецизійних вимірювань застосовують термостабілізовані приймачі випромінювання з рекомендованою площиною апертурної бленди  $1 \text{ см}^2$ , до того ж їхня внутрішня світлочутлива площа має бути значно більшою для того, щоб зменшити вплив внутрішнього відбиття світла в приймачі.

### 9.1.5 Вимірювання яскравості

При звичайних зорових роботах яскравість окремих СД, зазвичай, не має значення, оскільки відстань від СД до ока завжди така велика, що випромінюючий кристал сприймається як точка, яка світиться, а не поверхня. Тому сила світла корелюється з сприйняттям світлоти СД значно краще, ніж яскравість. Але, якщо за помилкою або необізнаністю хтось подумає подивитись на СД із дуже близьких відстаней, то саме яскравість може стати вирішальним фактором для пошкодження ока.

Відомо, що лазери поділяються на класи небезпечності, але значно менше відомо, що такий самий поділ існує і щодо СД. Раніше яскравість СД не досягала шкідливих значень, а зараз граничні значення яскравості не тільки досягнуті, але часто й перевищуються.

Є спрощений метод оцінки яскравості, відповідно до якого яскравість може бути розрахована за вимірюною світністю. Практично яскравість визначається як частка від ділення сили світла на площу поверхні, яка світиться. При дифузному світлорозподілу цей метод дає досить точні результати. Для сучасних СД з малими кутами випромінювання точність визначення яскравості



буде значно гірша, що створює певний ризик при розподілі СД за класами шкідливості.

#### 9.1.6 Вимірювання світлового (енергетичного) потоку

У промислових умовах світловий або енергетичний потік зазвичай вимірюється у фотометричних кулях, наприклад, діаметром 25 см, у яких він порівнюється з потоком близького за параметрами еталонного джерела світла. При цьому потік порівнюється практично за всіма напрямками, але переважно в напрямку оптичної осі. Для точності вимірювань важливо, вимірюється дійсно чи повний потік, чи парціальний, тобто виключається, наприклад, частина, яка виходить із підложки. У дійсності при вимірюванні світлових потоків проблема охопленого тілесного кута менша, ніж точність установки СД у фотометричній кулі; оскільки світловипромінювальна поверхня СД розташована поблизу стінки кулі, виникає поглинання світла, яке не може бути ні кориговане, ні враховане з достатньою точністю. Тому СД має влаштуватися у кулі так, щоб виключити можливі джерела похибки вимірювань. Питання влаштування СД не має значення при використанні еталонного зразка, який випромінює світло тільки в одну напівсферу, завдяки чому поглинання світла ближньою стінкою завжди може бути усунено.

Також для вимірювання світлового (енергетичного) потоку може використовуватись гоніометр. Вимірювальна головка фоторадіометра може знаходитись від СД на відстані від 20 мм до 800 мм. Відстань може змінюватись оператором, але у процесі вимірювань залишається постійною, наприклад 316 мм. Світлодіод може повертатися навколо двох перпендикулярних осей. У горизонтальній площині кут повороту  $\phi$  може змінюватись від  $0^\circ$  до  $360^\circ$  із кроком  $\Delta\phi = 2^\circ$ , у вертикальній  $\theta$  від  $0^\circ$  до  $85^\circ$  із кроком  $\Delta\theta$  також  $2^\circ$ . Так технічно просто визначається залежність освітленості (опроміненості) від кутового положення СД.

Розрахунок світлового (енергетичного) потоку виконується як об'ємне інтегрування середнього значення освітленості при постійному куті  $\theta_i$  і обертанні СД навколо горизонтальної осі. Це середнє значення, подане у вигляді функції кута  $\theta$ , є основою числового інтегрування.

$$\Phi = 2\pi d^2 \int_0^\pi E(\theta) \sin \theta d\theta. \quad (9.6)$$

Як приймач використовується прилад із зарядовим зв'язком (далі – ПЗЗ), лазер – для юстування СД і система обертання СД. При вимірюванні світлових величин спектральна чутливість приймача автоматично коригується під криву

денної спектральної чутливості ока  $V(\lambda)$ . Для вимірювання радіометричних величин використовують кремнієвий приймач. Вимірювальна головка пов'язана зі спектро радіометром кварцовим волоконним світловодом для вимірювання спектрального розподілу енергії випромінювання СД.

#### 9.1.7 Вимірювання спектрального розподілу енергії випромінювання світлодіодів

Спектральний розподіл енергії СД визначається за допомогою спектро радіометра. Раніше променева потужність СД була дуже мала, тому при вимірюванні поверхня кристала, яка світиться приставлялась безпосередньо до вхідної щілини спектро радіометра. На сьогодні СД зазвичай випромінюють світло в різних площинах. Це світло за допомогою внутрішнього відбивача й лінзи формується у заданому тілесному куті. Промеві потоки досить великі, тому приладом можуть бути сприйняті вимірювані величини в окремих напрямках, наприклад, у напрямку оптичної осі.

Часто як приймача спектро радіометра використовують ПЗЗ із 1 024-ма фотодіодами (поліхромат), який одночасно охоплює всю видиму зону спектра. На вимірювальному стенді деяких національних метрологічних інститутів спектральна зона чутливості становить 380–800 нм із ефективною шириною щілини близько 2,2 нм. Розкладання світла голографічною решіткою забезпечує приблизно лінійну шкалу довжин хвиль, яка може бути калібрована за допомогою спектральних ламп. Спектральна чутливість приладу залежно від довжини хвилі калібрується за допомогою еталонної лампи. Крок між калібрувальними значеннями, які задаються через 10 нм, інтерполюються через 1 нм. Завдяки цьому спектральний розподіл випромінювання СД має хорошу кореляцію між сусідніми значеннями.

Методи вимірювання основних параметрів СД торкаються просторових і спектральних розподілень випромінювання. Ці розподіли відрізняються високим градієнтом для багатьох параметрів, які можуть бути виміряні з певними похибками. Тому необхідні міжнародні рекомендації для вимірювання світлового (енергетичного) потоку та яскравості, оскільки це вже зроблено для сили світла та домінуючої довжини хвилі.

Єдність вимірювання світлового потоку особливо необхідна, оскільки СД будуть застосовуватись і для загального освітлення, і знання світлового потоку буде необхідне як база для розрахунку освітленості. Зі зростанням яскравості сучасних СД зростає й можливість їхньої шкідливої дії на око, тому яскравість також необхідно вимірювати й в ідентичних умовах.

## 9.2 Властивості світлодіодів

### 9.2.1 Оптичні властивості світлодіодів

Випромінення від світлодіодів може бути охарактеризовано радіометричними та спектрорадіометричними величинами. Якщо СД випромінює у видимій зоні спектра, то необхідні фотометричні та колориметричні величини, щоб характеризувати вплив на людське око. Отже, радіометричні, спектрорадіометричні, фотометричні та колориметричні величини з пов'язаними з ними одиницями можуть усі використовуватися для характеристики оптичного випромінювання, емітованого СД.

Відзначимо, що для кожної енергетичної величини є фотометричний аналог [2]. Єдина відмінність – те, що для енергетичної величини випромінювання оцінюється в одиницях потужності, тоді як для фотометричних величин випромінювання базується на функції відносної спектральної світлової ефективності випромінювання  $V(\lambda)$  і помножується на  $K_m$  (дорівнює 683 лм/Вт). Щоб уникнути непотрібних повторів, у всіх коментарях, де вони належать одночасно до радіометричних і фотометричних величин, посилання робляться тільки на фотометричні величини. Якщо вимірювання проведені відносно радіометричних величин, то фотометричний термін може бути замінений радіометричними еквівалентом.

Визначення оптичних властивостей СД має бути засновано та тих самих методах і засобах вимірювання, як і для інших типів джерел світла.

Є багато різноманітних, поширених на ринку СД, які відрізняються не тільки спектральним розподілом випромінювання в межах від квазіламбертівських характеристик до вузькоколіматованого променя з усіма можливими проміжними різновидами. Отже, доцільно застосувати деякі із величин, які, зазвичай, описують випромінення світильників, щоб охарактеризувати випромінювання від СД.

### 9.2.2 Просторовий розподіл

Оптичне випромінювання, створюване СД, генерується напівпровідниковим кристалом, закріпленим у корпусі певної форми (модуля) (рис. 9.6).

Модуль захищає чіп під час роботи, забезпечує з'єднання електричних контактів і підтримує його при маніпуляціях. Необхідно зазначити, що світлодіоди можуть бути виконані в широкому діапазоні конструкцій, які істотно впливають на просторові характеристики окремих СД. Лінзи, дзеркала,

розсіювачі можуть бути вбудовані в модуль для досягнення специфічних просторових характеристик випромінювання.

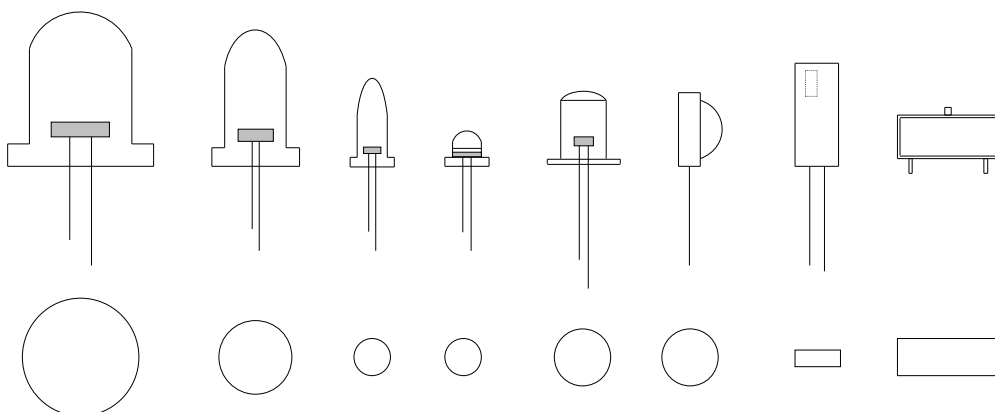


Рисунок 9.6 – Різні конструкції СД

Деякі з різноманітних просторових розподілів сили світла СД подані схематично на рисунку 9.7.

Розподіли нанесені з максимальним значенням, нормованим на одиницю. Вони вказують на можливість створення значної кількості варіантів і труднощі визначення універсального методу вимірювання.

### 9.2.3 Спектральні розподіли

Спектральні розподіли оптичного випромінювання СД є характеристикою цих приладів і відрізняється різними аспектами від спектральних розподілів інших джерел оптичного випромінювання. Спектральний розподіл типового одноколірного СД не є ні монохроматичним (як випромінювання лазером), ні ширококутовим (як у ламп розжарювання), але чимось поміж ними (квазімонохроматичним), із шириною спектральної смуги в декілька десятків нанометрів. Типові відносні спектральні розподіли СД для видимої зони спектра показані на рисунку 9.8. Відзначимо, що ефективність випромінювання СД значно змінюється від їхньої пікової довжини хвилі.

Невеликі модулі, які використовуються для СД, мають велику різноманітність розмірів і форм для світловипромінюючої поверхні. Поверхня світимості характеризується формою, розміром і розподілом яскравості вздовж неї. Яскравість всієї світловипромінюючої поверхні є усередненою величиною розподілу яскравості вздовж випромінюючої поверхні.

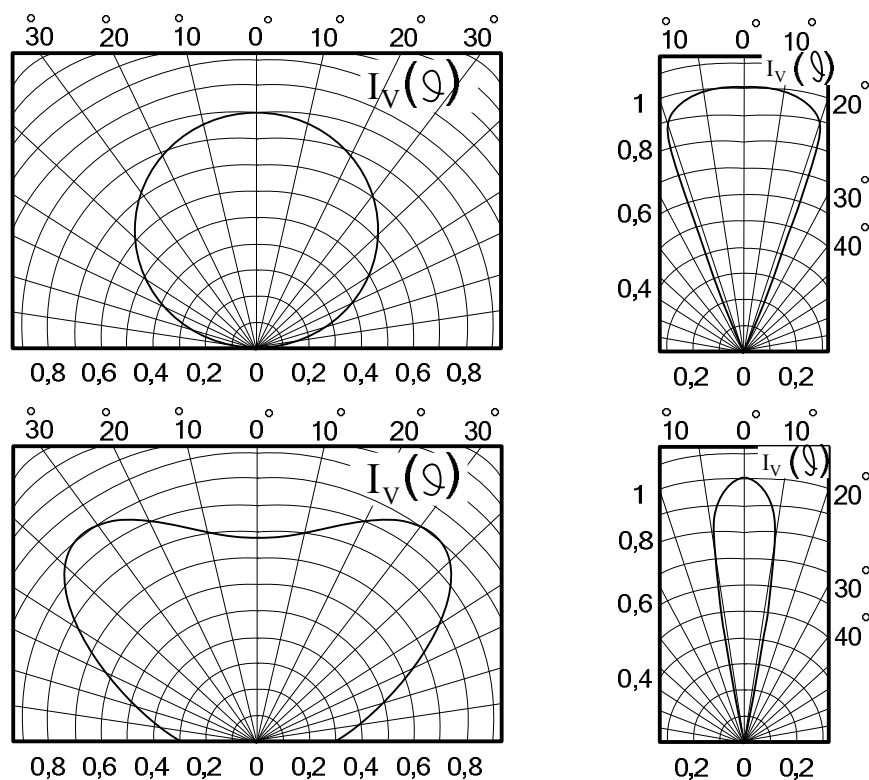


Рисунок 9.7 – Деякі типові просторові розподіли сили світла

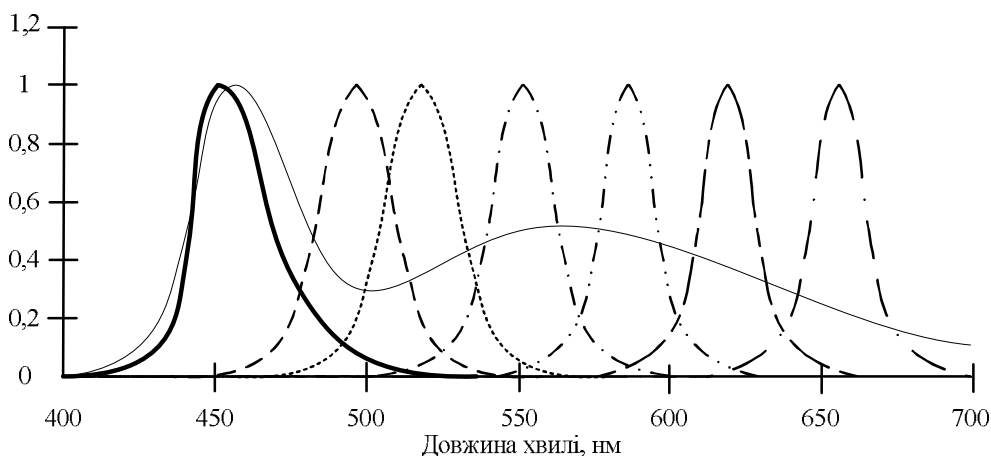


Рисунок 9.8 – Відносний спектральний розподіл потужності низки типових СД

Зазвичай, яскравість має максимум у центрі вихідного світлового пучка зі значно нижчими значеннями на краях, проте є розподіли, які істотно відрізняються в такій сфері застосування, як у світлодіодних лампах.

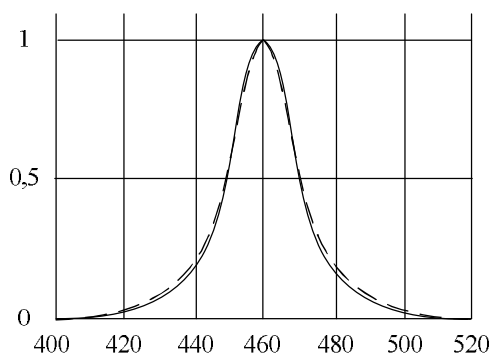
У деяких сферах застосування СД використовуються за умов, коли відстань між вихідним отвором модуля та приймачем порівняно мала, так що світловипромінююча поверхня діє як площа значної величини, і джерело світла не може більше сприйматися як точкове. У цьому разі відношення

освітленостей, які вимірюються на різних відстанях, більше не відповідає умовам закону обернених квадратів, і діаграма спрямованості випромінювання залежить від відстані від випромінювача. Це описується як умова «ближнього поля».

Навпаки, умова «далекого поля» з'являється, коли розмір випромінюючої поверхні достатньо малий порівняно з відстанню, на якій виконують вимірювання, так що закон обернених квадратів виконується, або коли діаграма спрямованості випромінювання вже не залежить від відстані до випромінювача.

### 9.2.4 Модель СД

У багатьох випадках зручно мати математичну модель спектрального розподілу СД, наприклад, коли аналізуються похибки спектральної невідповідності фотометрів для СД різних пікових довжин хвиль. Для апроксимації спектра  $S_{\text{СВД}}(\lambda)$  із будь-якою піковою довжиною хвилі та половиною ширини спектра  $\Delta\lambda_{0,5}$  використовують таку формулу:



$$S_{\text{СВД}}(\lambda, \lambda_0) = \frac{\{g(\lambda, \lambda_0) + 2g^5(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0,5})\}}{3},$$

$$\text{де } g(\lambda, \lambda_0) = \exp\left[-\left\{\frac{(\lambda - \lambda_0)}{\Delta\lambda_{0,5}}\right\}^2\right]. \quad (9.7)$$

Одиницею довжини хвилі є нм.

Рисунок 9.9 – Порівняння моделі  $S_{\text{СВД}}(\lambda, \lambda_0)$  із реальним спектром СД

### 9.2.5 Вихідні еталони

Апаратура, яка використовується для вимірювання характеристик СД, має бути калібрована вихідними еталонами СД, які спеціально відбираються й досліджуються. Вони мають працювати на постійному струмі з температурою кристала, яка підтримується на постійному рівні. Коли для регулювання температури кристала використовується допоміжна система нагрівання, СД може бути стабілізований, використовуючи як індикатор температурну залежність прямої напруги, яка буде підтримуватись при знайденому значенні.

Світлодіоди, які використовуються як вихідні еталони, можуть бути виготовлені спеціально, зокрема окремі елементи опору або транзистор, встановлені в модуль СД для оптимізації теплового контакту між нагрівником і кристалом. Рисунок 9.10 показує схематичне зображення такого вихідного еталона. Цей принцип наполегливо рекомендується для всіх вихідних еталонів СД.

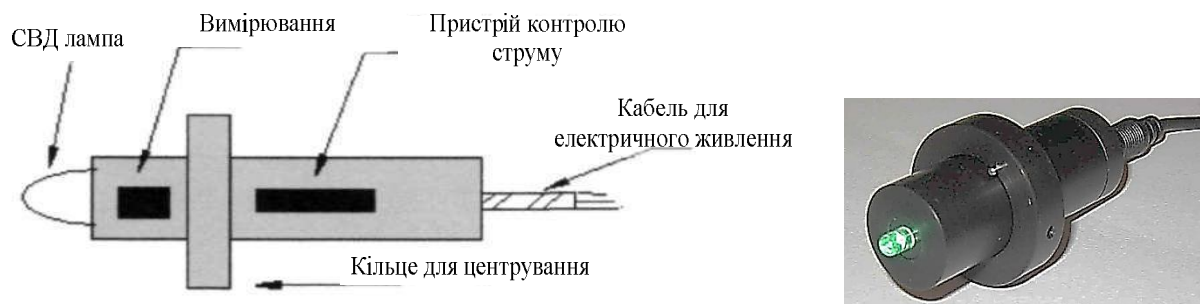


Рисунок 9.10 – Схематична діаграма температури стабілізованого еталона СД

Калібрування первинних еталонів має бути виконано національним метрологічним інститутом (далі – НМІ) або лабораторією, пов’язаною з НМІ. Точний опис вимірювальної процедури (методики) і бюджет невизначеностей мають бути дані для кожного каліброваного еталонного СД. Національний метрологічний інститут, який проводить калібрування, має бути також ідентифікованим.

Вихідний еталон СД, встановлений у спеціально розроблений модуль, має бути типовим, як СД. Вибраний СД має бути «відпаленим» (тобто має напрацювати певний час) протягом, зазвичай, 500 годин при потужностях, які пізніше будуть використовуватися під час роботи. Прискорене піддавання старінню, витримане при більш високих струмах, не рекомендується. Важливо, щоб СД, підібраний як еталон, мав спектральний і просторовий розподіли потужності, максимально близькі до відповідних характеристик тестованих СД. Модуль повинен мати термостат для підтримки еталонного СД при заданій температурі, а також пристрій для забезпечення постійного струму, щоб гарантувати постійний оптичний вихідний сигнал.

### 9.3 Режими функціонування з часовими залежностями

У багатьох сферах застосування СД працюють при неусталених режимах, таких як модульований струм, однокантний або мультиплексний режими. Оскільки вихідні характеристики СД піддаються впливу цих робочих умов,



важливо вказувати режим роботи при складанні даних щодо характеристики СД.

### 9.3.1 Режим модульованого струму

Збільшення струму викликає збільшення світлового виходу й температури кристала, яке, зі свого боку, спричиняє збільшення світлового виходу. У випадку режиму модульованого струму температура кристала буде також змінюватися так, що усереднений вихідний сигнал буде відрізнятися від того, який одержується при роботі у сталому режимі з постійним струмом того самого значення. Отже, радіаційна ефективність  $h_e$ , яка є відношенням потужності випромінення  $\Phi_e$  до вихідної електричної потужності  $P$ , є функцією усередненого струму, навіть якщо СД працює повністю в межах нормального робочого діапазону між пусковим рівнем і рівнем насичення.

### 9.3.2 Імпульсний режим

Під час виробничого контролю вимірювання для визначення характеристик кожного СД, часто виконуються як однократні дії в межах частки секунди й при рівнях струмів, які типово використовуються при сталих режимах роботи. Для більшості СД теплоємність і теплопровідність кристала та модуля є надто великими, щоб досягнути значення температури сталого режиму за такий короткий час. Отже, цей режим модифікує одержані значення СД характеристик. На щастя, ці значення за умови однократного режиму строго корельовані зі значеннями усталеного режиму. Істинні характеристики можуть бути обчислені за допомогою корегувань, визначених на основі кількох додаткових вимірювань.

### 9.3.3 Мультиплексний режим

За умов мультиплексного режиму періодично на короткий час вмикається та вимикається струм, середнє за часом значення якого дорівнює значенню постійного струму за умов звичайного функціонування. Як і у випадку однотактного режиму, має бути досягнуто кореляції між відношеннями вихідних параметрів до струмів у мультиплексному режимі та в режимі постійного струму, що можна також досягти кількома додатковими вимірюваннями.

### 9.3.4 Пряме падіння напруги

Значення прямого падіння напруги залежить від напівпровідникового матеріалів СД з різноманітністю до 5 різних видів, які є в наявності. За встановлюваного зазвичай значення струму функціонування 20 мА типові значення падіння напруги становлять від 1,2 В у діодів інфрачервоного випромінювання до 6,5 В у синіх СД. Падіння напруги  $U_n$  окремих СД залежить від струму  $I_n$  та від температури напівпровідникового  $p$ - $n$ -переходу, яку в першому наближенні може бути замінено температурою  $T_k$  кристала

$$U_n = U_n(T_k, I_n). \quad (9.8)$$

Повний диференціал  $dU_n$  розрізняє два впливи:

$$dU_n = \frac{U_n}{I_n} \cdot dI_n + \frac{U_n}{T_k} \cdot dT_k. \quad (9.9)$$

### 9.3.5 Залежність прямого падіння напруги від струму

За умов стабілізованої температури залежність між прямим падінням напруги та струмом має добре відомий характер, загальний для всіх напівпровідникових діодів. У діапазоні звичайного функціонування – між післяпусковим рівнем та рівнем насичення, вона добре наближається до лінійної залежності з тангенсом кута нахилу

$$\frac{\partial U_n}{\partial I_n} \approx 10V \cdot A^{-1}. \quad (9.10)$$

Якщо СД функціонує, маючи робочу точку, що відповідає струму  $I_{n0}$  та напруги  $U_{n0}$ , і диференціальний опір, у цій точці визначається як

$$R_{n0} = \frac{\Delta U_{n0}}{\Delta I_{n0}}, \quad (9.11)$$

то ампер-вольтова характеристика може бути апроксимована формулою:

$$U_n(I_n) = R_{n0} \cdot I_{n0} \cdot \ln \left( b \cdot \frac{I_n}{I_{n0}} - 1 \right), \quad (9.12)$$

де 
$$b = \exp \left( \frac{U_{n0}}{R_{n0} \cdot I_{n0}} \right) R_{n0} \cdot I_{n0}. \quad (9.13)$$

На рисунку 9.11 проілюстровано залежність між прямим падінням напруги на СД та струмом за робочої точки, що відповідає умовам  $U_{п0} = 2$  В та  $I_{п0} = 20$  мА, за чотирьох різних значень диференціального опору  $R_{n0}$ .

### 9.3.6 Залежність прямої напруги від температури

У разі функціонування за звичайної температури середовища питомі значення температурного коефіцієнта  $\frac{\partial U_n}{\partial T_k}$  прямого падіння напруги в більшості СД за умов постійного струму припадають на діапазон:

$$\frac{\partial U_n}{\partial T_k} [-1,5; 2,5] мВ \cdot ^\circ C^{-1}. \quad (9.14)$$

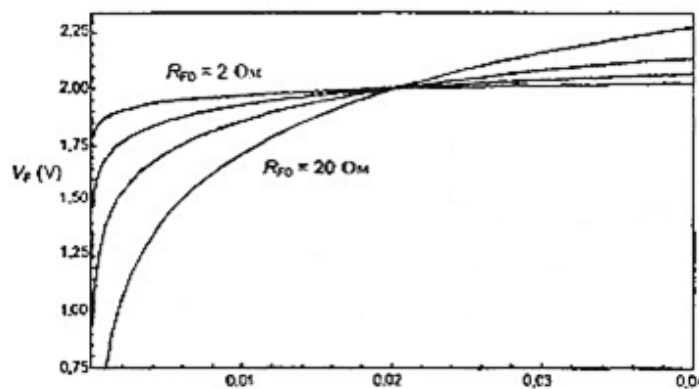


Рисунок 9.11 – Залежність між прямим падінням напруги та струмом типових СД за умов  $U_{п0} = 2$  В та  $I_{п0} = 20$  мА та за різних значень  $R_{n0}$

### 9.3.7 Температура середовища

Якщо не встановлюється інше, температура середовища  $T_c$ , за якою оцінюються параметри СД, має становити  $25$   $^\circ C$ . Після подачі вхідної потужності на кристал його температура  $T_k$  зростає та стабілізується на рівні  $T_k > T_c$ . Рівень температурних змін залежить від величини вхідної потужності, теплоємності та теплотужності корпусу СД. Після досягнення теплової рівноваги значення  $T_k$  визначається передачею тепла до середовища, яка відбувається переважно через підкладку СД (у випадках старих конструкцій – через струмоводи СД). Як наслідок, теплообмінні властивості електричних контактів живлення СД та довжини дротів між кристалом і контактами можуть істотно впливати на результати вимірювань.

Температура кристала СД буде порівняно незмінною за умов короткочасного однократного режиму функціонування, але в разі функціонування за умов постійного струму зазвичай буде мале зростання

температури. Температурні явища, які відбуваються в разі модульованого або мультіплексного функціонування, описано вище.

## 9.4 Вплив температури на випромінювання

### 9.4.1 Зміщення довжини хвилі максимуму випромінювання за змінення температури

За постійного струму та температурно стабілізованого падіння напруги потужність, споживана СД, буде сталою. Проте варто зазначити, що стабілізація потужності без регулювання температури буде спричиняти досить різні умови функціонування. На спектральний розподіл відносної інтенсивності випромінювання це буде впливати двома шляхами. З одного боку, буде дещо змінюватися форма кривої розподілу; з іншого боку, зі зростанням температури весь графік розподілу може істотно зміщуватися: у СД на основі GaAsP – у бік довгих хвиль, а у СД на основі GaInN (наприклад, у синіх СД) – у бік коротких. Стосовно типових СД це зміщення становить:

$$\frac{\partial \lambda_p}{\partial T_k} [0,1; 0,3]_{нм} \cdot ^\circ C^{-1}. \quad (9.15)$$

### 9.4.2 Вплив температури на ККД та світлову віддачу

Малі зміни температури дуже слабо впливають на випромінювальні ККД – СД. Світлові видачі зелених СД є завжди майже сталими, оскільки довжини хвиль максимумів випромінювання таких СД і функції  $V(\lambda)$  є близькими. На світлові віддачі СД з максимумами випромінень на «хвостах» функції  $V(\lambda)$  зміщення спектрального розподілу впливає сильніше. Тому світлові віддачі червоних або синіх СД змінюються суттєво за порівняно малих змінень температури. Оскільки характери спектральних розподілів СД залежать як від споживаної потужності, так і від температури кристала, стабілізація струму та температури є найкращими способами регулювання умов функціонування та підтримування устанавленого спектрального розподілу.

## 9.5 Технологічні відхилення

Деякі з важливих величин, використовуваних для характеризування оптичних випромінювань діодів залежать від просторових розподілів. Тому важливо точно орієнтувати СД перед вимірюваннями їхніх параметрів. На жаль, існує дві осі обертання навколо напрямку від СД – одна пов'язана з корпусом, а друга – із просторовим розподілом утворюваного випромінювання.

Зони випромінюваності, які можуть мати різні форми, розміри та структури, часто не мають чітко вираженого обмеження контурів; тому може бути складно точно визначити місце розташування світлового центра. Із додаванням типових технологічних відхилень це спричиняє ускладнення з розташуванням та орієнтуванням і призводить до збільшення невизначеностей вимірювань.

На рисеуге 9.12 показано СД, у якого геометрична вісь корпусу та оптична вісь пучка світла не збігаються. Під час виробничих випробувань зазвичай бракує часу для встановлення СД у випробний затискач так, щоб сила світла вимірювалася в напрямку оптичної осі. У разі відбирання СД для еталонів важливим є те, щоб у них оптичні та геометричні осі збігалися.

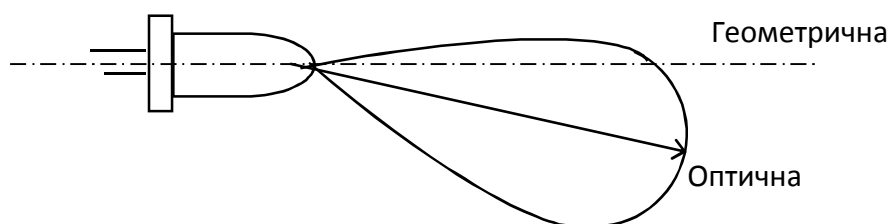


Рисунок 9.12 – СД, у якого геометрична та оптична осі не збігаються

## 9.6 Властивості фотометрів/радіометрів

Для вимірювань СД використовується фотометри або радіометри, і/або спектрорадіометри залежно від того, радіометричні чи фотометричні величини або ті, і другі вимірюються. Фотометр або радіометр для СД вимірювань зазвичай складається із приймача, фільтра, вхідної апертури, електричного пристрою для підсилення та електронного кола для посилення вихідного сигналу. Щодо загальних вимог до фотометрів [63].

### 9.6.1 Фотоприймачі

При конструюванні фотометрів або радіометрів зазвичай використовуються кремнієві фотодіоди. Кремнієві фотодіоди мають діапазон, чутливості від ультрафіолету до ближнього інфрачервоного діапазону приблизно до 1100 нм із піковою чутливістю близько 900 нм. Кремнієві фотодіоди зазвичай мають лінійну характеристику в кілька порядків вхідного світлового потоку, і також малу температурну залежність чутливості у видимій зоні. Варто відзначити, що фільтри мають більшу температурну залежність їхніх коефіцієнтів пропускання.

### 9.6.2 Кутова та просторова чутливість фотометрів і радіометрів

Фотометр і радіометр для вимірювань. Усередненої СД сили світла/енергетичної сили світла не потребує косинусної насадки, оскільки світло падає в малому куті. Вони повинні мати однорідну чутливість тільки в діапазоні кутів, під яким випромінення від досліджуваного СД може падати на фотометр або радіометр. Тому косинусна насадка взагалі не потребується на фронтальній площині фотометра або радіометра для вимірювання сили світла; проте розсіювач може бути використаний для утворення світної зони поверхні, яка більша, ніж світлочутлива зона приймача, (необхідно відзначити, що мала відстань до джерела потребує значно більшої світлочутливої поверхні приймача, ніж вхідна апертура фотометра). З іншого боку, фотометр/радіометр, який використовується з інтегрувальною сферою для вимірювання сили світла або потоку випромінювання, потребує косинусного коригування.

Для вимірювання «Усередненої СД інтенсивності» чутливість вхідної апертури фотометра/радіометра має бути однорідною, щоб гарантувати, що все випромінення, яке досягає вхідної апертури, вимірюється з однаковою вагомістю. Деякі СД мають вузькі кути або нерівномірний розподіл сили світла, які можуть створювати нерівномірний розподіл освітленості вздовж апертури. Якщо чутливість уздовж вхідної апертури неоднорідна, це може визначити значну похибку при вимірюванні «Усередненої СД сили світла», зокрема в разі геометрії МКО «В» для таких СД. Фотометр із хорошою просторовою однорідністю часто конструюється при використанні недифузного типу фотометра (це потребує фотодіода з великою приймальною поверхнею), або використовуючи малу інтегрувальну сферу як вхідну оптику. Розсіювачі (такі як опалове скло) також часто використовуються з цією метою, особливо коли використовується малий фотодіод. Узагалі складно досягнути хорошої просторової однорідності, використовуючи розсіювач. Ретельне конструювання та вибір розсіювальних матеріалів необхідні для досягнення суттєво хорошої просторової однорідності.

### 9.6.3 Спектральна чутливість фотометрів/радіометрів

Спектральну чутливість  $S(\lambda)$  фотометра/радіометра можна виразити через абсолютний коефіцієнт  $S_0$  і функцію  $S_r(\lambda)$  відносної спектральної чутливості формулою:

$$S(\lambda) = S_0 S_r(\lambda). \quad (9.16)$$

Якщо приймач опромінюється випромінюванням зі спектральним розподілом  $X(\lambda)$ , фотострум  $I$  можна обчислити з виразу:

$$I = X_0 S_0 \int_0^\infty S_r(\lambda) S(\lambda) d\lambda. \quad (9.17)$$

Тут  $X(\lambda) = X_0 S(\lambda)$ , де  $X_0$  – нормувальний фактор і  $S(\lambda)$  – відносний спектральний розподіл.  $X(\lambda)$  репрезентує, яка із фотометричних або радіометричних величин має вимірюватися.

Відносна спектральна чутливість фотометра має бути наближена якомога більше до  $V(\lambda)$ , функції спектральної світлової ефективності для фотопічного бачення. Відносна спектральна чутливість радіометра має бути якомога сталою у всьому вибраному спектральному діапазоні.

#### 9.6.4 Фотометр для вимірювання білих СД

Робочі (комерційні) фотометри зазвичай класифікуються за величиною  $f'_1$  [4],  $f'_1$  – характеризує похибку, обумовлену відхиленням спектральної характеристики фотометра від  $V(\lambda)$  – кривої. Фотометри з такою класифікацією рекомендується для вимірювання параметрів білих СД.

Якщо застосовується коригування на спектральну невідповідність, то рекомендується, щоб фотометри для вимірювання параметрів білих СД мали значення  $f'_1 < 3,0\%$ . При цьому  $f'_1$  визначається в такий спосіб:

$$f'_1 = \frac{\int |S^*(\lambda)_{rel} - V(\lambda)| d\lambda}{\int V(\lambda) d\lambda}, \quad (9.18)$$

де  $S^*(\lambda)_{rel}$  – нормована відносна спектральна чутливість приймача:

$$S^*(\lambda)_{rel} = S(\lambda)_{rel} \cdot \frac{\int S(\lambda)_A V(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda)_A S(\lambda)_{rel} d\lambda}, \quad (9.19)$$

де  $S(\lambda)_A$  – відносний спектральний розподіл променевого потоку стандартного випромінювання (ілюміната) типу А МКО. Останній включений для того, щоб мати на увазі той факт, що фотометри, зазвичай, калібруються, використовуючи набір вольфрамових ламп розжарювання з розподілом температури для стандартного джерела типу А. Похибки для білих СД можуть бути мінімізовані, якщо  $f'_1$  мала, але завжди необхідно належно оцінювати невизначеності.

Якщо фотометри, які використовуються для СД вимірювань, не відповідають рекомендаціям для  $f'_1$ , використання таких фсамого ж типу еталонного й випробуваного світлодіодів, які мають той самий колір) або такі фотометри оснащуються індивідуальними даними з виміряною відносною чутливістю так, що може бути застосовано коригування різниці у спектрах.



### 9.6.5 Фотометр для вимірювання кольорових (не білих) СД

У випадку однокольорових СД похибки спектральної невідповідності можуть бути значно більшими, навіть якщо  $f_1'$  є досить малою величиною, завдяки тому факту, що спектри деяких СД мають максимум на «крилах» функції  $V(\lambda)$ , де різниця у формулі (9.18) слабо впливає на значення, спричиняють незначний вплив на  $f_1'$ , але саме воно може спричинити великі похибки.

Фотометри, які вимірюють одноколірні СД, рекомендується забезпечувати відносною спектральною чутливістю їх із прикладами коригування похибок спектральної невідповідності й оцінювання невизначеності вимірюваної фотометричної величини даних кольорових СД.

## 9.7 Величини, які визначаються просторовими співвідношеннями

### 9.7.1 Нормувальний коефіцієнт і відносний просторовий розподіл

Узагалі сила світла  $I(\theta, \varphi)$  залежить від напрямку  $(\theta, \varphi)$ , і ця залежність називається просторовим розподілом сили світла. Необхідно відзначити, що вимірювання сили світла, зокрема стосовно конференції просторового розподілу, мають бути зроблені в межах елементарного тілесного кута  $d\Omega$ , і це потребує приймача, діаметри вхідної апертури якого й розміри джерела були малими порівняно з відстанню між ними. Якщо абсолютна величина сили світла  $I(\theta, \varphi)$  вимірюється в певному вибраному напрямку, що відповідає умовам  $\theta = \theta_0$  і  $\varphi = \varphi_0$  і позначається  $I_{00} = I(\theta_0, \varphi_0)$ , тоді це може бути використано, як нормувальний коефіцієнт може бути визначена функція  $G(\theta_0, \varphi_0)$  відносно просторового розподілу сили світла. Просторовий розподіл сили світла  $I(\theta, \varphi)$  можна виразити як:

$$I(\theta, \varphi) = I_{00} \cdot G(\theta_0, \varphi_0), \quad (9.20)$$

який можна переписати в такий спосіб:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{I(\theta, \varphi)}{I_{00}}. \quad (9.21)$$

Для просторового розподілу сили світла відсутня залежність від кута  $\varphi$  при кутах  $\theta = 0$  і  $\theta = \pi$ . Отже, значення в напрямку  $\theta = 0$  зазвичай має переваги для нормування, беручи  $I_{00} = I(\theta = 0)$ .

Найпростіша формула функції  $G(\theta, \varphi)$  виглядає так:

$$G(\theta) = G, \quad (9.22)$$

де  $G$  – константа. Вона становить сферичний, просторовий розподіл повністю ізотропного точкового джерела.

Іншим просторовим розподілом, який легко виражається математично, є Ламбертівський розподіл: просторовий розподіл із  $\theta$  – вимірним кутом між вибраним напрямком і перпендикуляром до поверхні для всіх значень  $\theta$  дається

$$G(\theta) = G_0 |\cos \theta|, \quad (9.23)$$

де діапазон кутів обмежується напівсферою з  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ .

Цей просторовий розподіл зазвичай використовується як базовий.

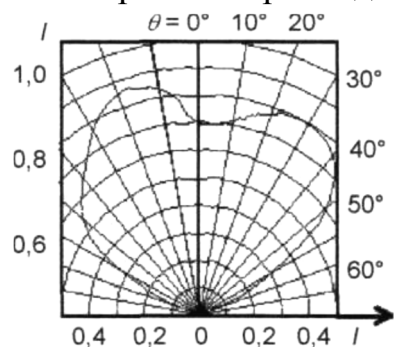
Неможливо виразити більшість практичних просторових розподілів у термінах простої математичної функції, проте симетричні просторові розподіли часто характеризуються кутами, які відповідають 50 і 10 % максимального значення. Необхідно зазначити, що для структурованих кривих (зі складним порізаним профілем) просторових розподілів можна вибирати більше ніж один кут який становить 50 або 10 % від максимального значення. При використанні цього методу рекомендується відкладати кути, що відповідають таким значенням поглинання з  $\theta = 0^\circ$  (із вимірюваннями від напрямку геометричної осі).

Більшість СД сконструйовано для забезпечення розподілу з максимумом сили світла в напрямку  $\theta = 0$ , проте це не завжди можливо й для деяких СД конструкція приладу дає істотно нижче значення в напрямку геометричної осі, ніж для деяких кутів поза вісями. Один із таких прикладів на рисунку 8.7 ілюструє цей ефект.

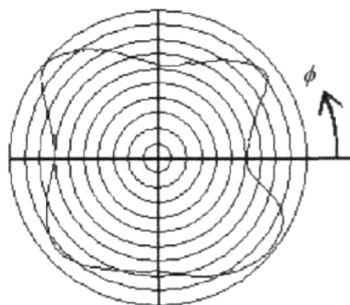
Інколи, через промислові припуски, навіть коли СД змонтовано в циліндричному корпусі, механічна вісь модуля (яка використовується для юстування СД у вимірюваній системі) й оптична вісь (яка є віссю обертальної симетричної просторового розподілу) можуть мати деякі різні напрямки (див. рис. 9.12).

Процедура вимірювання має брати до уваги те, що цей вплив може відбитися на результатах.

У будь-якому разі всі серійні СД не мають абсолютно аксіально симетричних розподілів. Рисунок 9.13 демонструє два приклади зазвичай асиметричного розподілу, які інколи трапляються в СД і можуть спричинити



а



б

Рисунок 9.13 – Два несиметричних розподіли сили світла, які часто зустрічаються: а – оптична вісь, далека від геометричної; б – просторовий розподіл сили світла не вісесиметричний відхиленням від кругової симетрії.

складності з орієнтуванням. Просторовий розподіл СД, зображений на рисунку 9.13, а, має мінімум у напрямку осі корпусу ( $\theta = 0^\circ$ ) і максимум поза осьового напрямку. На рисунку 9.13, б (просторовий розподіл  $I(\phi)$ ) продемонстровано переріз  $\theta = const$  стосовно СД, форма розподілу сили світла якого спричинена

## 9.7.2 Вимірювання направлених величин

### Сила світла

Сила світла визначається як відношення світлового потоку  $d\Phi$ , що утворюється джерелом і поширюється в елементарному тілесному куті  $d\Omega$  у певному напрямку, до величини кута:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (9.24)$$

Хоча на перший погляд це може здатися простим питанням – проведення вимірювання світлового потоку в тілесному куті в певному напрямку – дійсності часто ситуація значно складніша. Концепція сили світла потребує припущення про точкове джерело, або щоб, у крайньому разі, розміри джерела були такими, що нехтують малими порівняно з відстанню між джерелом і приймачем; і є також вимога, щоб вимірювання були проведені в межах дуже малого тілесного кута.

Багато СД мають відносну широку поверхню випромінювання, яка при малих відстанях, на яких доводиться вимірювати, може бути достатньо великою, щоб вважатися точковим джерелом. Крім того, корпуси СД часто містять лінзи, які зміщують світлові центри.

## Освітленість

Освітленість  $E_V(\theta, \phi)$ , утворення на відстані  $d$  від джерела в напрямку  $(\theta, \phi)$  на елементі поверхні, перпендикулярному до цього напрямку, пов'язана з силою світла в тому самому напрямку рівнянням:

$$E_V(\theta, \phi) = \frac{I_V(\theta, \phi)}{d^2} \quad (9.25)$$

за умови, що відстань є достатньо великою, щоб джерело могло вважатися точковим, і кутовий розмір фотоприймача був принаймні малим настільки, щоб освітленість була рівномірною. Рівняння (9.25) відоме як «закон обернених квадратів», проте воно може бути переписане у вигляді:

$$I_V(\theta, \phi) = E_V(\theta, \phi) \cdot d^2. \quad (9.26)$$

Це є основою для практично всіх вимірювань сили світла. Дійсно, вимірюваною величиною є освітленість на поверхні фотометра, і сила світла тоді обчислюється на основі рівняння (9.26) шляхом перемноження освітленості на квадрат відстані від джерела.

Для точних вимірювань сили світла, однак, важливо не тільки, щоб були порівняно малих розмірів джерела та кутовий розмір приймача, а й те, щоб можна було точно вимірювати відстань між джерелом і фотометром. Оскільки може бути складно визначити фактичне місце розташування світлового центра СД через наявність у нього лінзи або з інших причин, відстань часто вимірюється від довільної точки на корпусі модуля СД.

## Місце розташування випромінюючої поверхні

Якщо відстань для вимірювання досить велика, фактичне положення базової точки не повинне мати істотно значення, але через значну різноманітність типів СД не має загального правила, яке може бути сформульоване, щоб визначити мінімальну відстань для точного вимірювання [5]. Це є причиною того, чому МКО рекомендує використання поняття «Усередненої сили світла СД».

## Вимірювання за умов «ближнього поля» і «дальнього поля»

Під час реальних вимірювань сили світла розміри поверхні випромінюючої зони та сприймаючої поверхні фотометра мають бути малими настільки, щоб ними можна було нехтувати порівняно з відстанню між ними. У цьому разі закон обернених квадратів буде виконуватись, і освітленість на

поверхні приймача дорівнюватиме  $E_V = \frac{I_V}{d^2}$ , де  $I_V$  – сила світла джерела в цьому напрямку і  $d$  – відстань між світловим центром джерела та приймача. На таке інколи посилаються як на умову «дальнього поля». Проте в багатьох випадках вимірювання виконуються на порівняно малих відстанях від СД, коли будь-який відносний розмір джерела є достатньо великим, щоб його трактувати як точкове джерело, або кут, що охоплює приймач від джерела, є також великим. Ця умова відома як умова «ближнього поля». Закон обернених квадратів у цьому разі більше не виконується, і освітленість, яка вимірюється приймачем, критично залежить від умов вимірювання.

### 9.8 Усереднена сила світла СД

У документації виробника одним із найбільш загальних параметрів, на який посилаються, як на вихідний сигнал СД, є сила світла. На жаль, у багатьох випадках цей термін некоректно використовується, і вимірювана величина не є дійсною силою світла.

Фактично застосована процедура передбачає вимірювання потоку, що падає на приймач, розташований на відстані вимірювань від СД, і обчислення тілесного кута діленням площі приймача на квадрат відстані. Оскільки ці вимірювання зазвичай проводять при порівняно малих відстанях між приймачем і СД, випромінююча зона СД в багатьох випадках достатньо велика порівняно з відстанню до приймача, діє переважно як скоріше протяжне джерело, ніж точкове. Ця ситуація відома як «умова ближнього поля», яка описана вище. Також можливо, якщо приймач так близько до джерела, що значення істинної сили світла будуть істотно відрізнятися від тих, що спостерігаються з окремих частин поверхні приймача.

У таких ситуаціях, які є дуже поширеними в сфері вимірювань параметрів СД, вимірювана величина не є силою світла в традиційному сенсі, але становить середню силу світла діода, усереднену як по різних окремих елементах, що утворюють протяжну випромінюючу поверхню СД, так і по різних частинах поверхні приймача. На жаль, ця різниця не є грою слів у існуючому формулюванні визначення. Це є реальною проблемою, оскільки за такої ситуації результати вимірювань та використовуваність знайдених вимірюваннями значень критично залежить від умов, за яких проводяться вимірювання. Це потребує узгодження та визначення точної геометрії вимірювань, яка б могла використовуватися стосовно широкого асортименту СД, для правильного порівняння різних виробів і, що не менш важливо, однакових виробів різних виробників.

Як спосіб подолання цієї проблеми, МКО вирішила рекомендувати впровадження нового підходу, специфічного для випробувань СД, – описувати вимірювані величини за умов так званого «ближнього поля» та визначити дві пов'язані з цим стандартні геометрії вимірювань. Ці геометрії базуються на поточних методиках у промисловості та на думках, висловлених як виробниками, так і користувачами СД.

Цей новий термін має назву «Усереднена сила світла СД» (усереднена сила випромінювання СД).

Геометрії вимірювань позначаються як стандартні умови А та В МКО для випробувань СД. Відповідно, усередненим силам світла СД, визначеним за цих умов рекомендуються позначення  $I_{CD\ A}$  та  $I_{CD\ B}$ . Вони можуть використовуватися як стосовно енергетичних, так і світлових величин (наприклад,  $I_{CD\ A\ e}$ ;  $I_{CD\ B\ v}$ ).

За умов обох геометрій використовуються приймачі з круговою входною апертурою площею в  $100\text{ мм}^2$  (що відповідає діаметру 11,3 мм).

СД повинен бути встановлений перед приймачем і виставлений у такий спосіб, щоб механічна вісь СД проходила через центр апертури приймача.

Це відстань між СД і приймачем, яка становить різницю між умовами А і В.

Відстані такі:

- для МКО Стандартна Умова А: 316 мм,
- для МКО Стандартна Умова В: 100 мм.

В обох випадках відстань вимірюється від передньої головки СД до площі входної апертури фотометра або радіометра.

Якщо приймач був калібрований за освітленістю, усереднена сила світла СД можна тоді обчислити за співвідношенням:

$$I_{CD\ B\ v} = E_v \cdot d^2, \quad (9.27)$$

де  $E_v$  – усереднена освітленість у лк, виміряна приймачем;

$d$  – відстань, виражена в метрах.

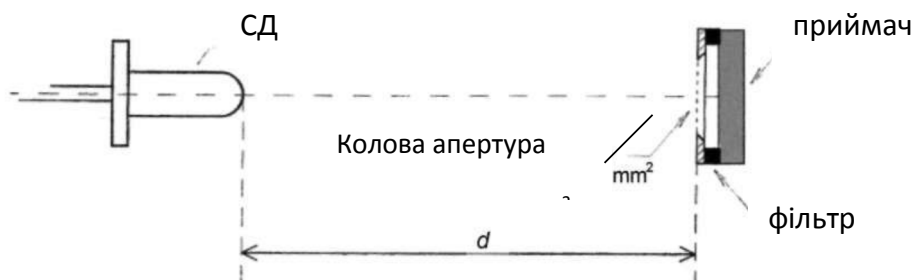


Рисунок 9.14 – Схематична діаграма МКО – Стандартні умови для випромінювання усередненої сили світла СД. Відстань  $d = 316\text{ мм}$  для умови А,  $d = 100\text{ мм}$  для умови В

Для умови  $A$ ,  $d = 0,316$  м і умова  $B$ ,  $d = 0,100$  м. Ці умови відповідають тілесному куту поля зору в  $0,001$  ср для умови  $A$  і  $0,01$  ср для умови  $B$ , проте фактичні розміри також важливі, як і кути в забезпеченні узгоджених результатів. Еквівалентні повні плоскі кути дорівнюють приблизно  $2^\circ$  для умови  $A$  і  $6,5^\circ$  для умови  $B$ .

### **9.9 Вимірювання просторових і спрямованих параметрів**

Бажано, щоб світлодіоди, відібрані для використання як робочих еталонів, мали відносний просторовий розподіл сили світла такий самий, як у випробуваних СД. У разі вимірювань світлових потоків СД з використанням інтегрувальної сфери використання еталонних СД, які мають подібні пучкові характеристики, будуть мінімізувати просторові похибки через неоднорідність інтегрувальної сфери. Для вимірювань сили світла ця вимога не є такою критичною, проте використання еталонних СД, які мають подібні пучкові характеристики, допоможуть зменшити похибку від розсіяного світла (похибка, пов'язана зі світлом, яке потрапляє на фотометр не безпосередньо від джерела).

Еталонні СД для вимірювань інтенсивності необхідно відібрати так, щоб оптична вісь променя співпадала приблизно з механічною віссю, і просторовий розподіл навколо центральної осі (в межах  $\pm 10^\circ$ ) був плавним і достатньо сталими, постійним, так щоб похибка юстування не спричиняла значних вимірювальних невизначеностей. Отже, світлодіодів, які мають вузький пучок або деяку структурність кривих розподілу сили світла, необхідно уникати. Вимірювання для перевірки характеристик просторового розподілу інтенсивності необхідно проводити як перший крок у відборі відповідних еталонних СД. Якщо лабораторія оснащена гоніометром, це необхідно використати для проведення прямих вимірювань просторового розподілу інтенсивності. Найкращим способом є розташування передньої головки СД в центрі гоніометра й вимірювання випромінювання на такій далекій відстані, наскільки дозволяє прилад.

У лабораторіях, де відсутній гоніометр, випробування можуть полягати в освітленні аркуша білого паперу пучками від СД з порівняннями характеристик пучків.

### **9.10 Вимірювання усередненої сили світла світлодіодів**

#### **Метод заміщення**

Досліджуваний СД калібрується порівнянням з еталонним СД того самого типу з подібним спектральним розподілом. Еталонний СД повинен



калібруватися за тієї самої геометрії (умови МКО *A* або *B*), що й при вимірюваннях випробуваного СД.

Усереднена сила світла СД  $I_{LED}$  [кд] випробуваного СД одержується із

$$I_{CBД, test} = \frac{y_{test}}{y_{ref}} I_{CBД, ref}, \quad (9.28)$$

де  $I_{CBД, ref}$  і  $I_{CBД, test}$  – усереднена сила світла СД випробуваного СД;

$y_{ref}$  і  $y_{test}$  – фотометричні сигнали еталонного СД і випробуваного СД.

За такими методом заміщення не має ніякої потреби у виправленні спектральної невідповідності, й вимірювання є простішим. Проте, якщо вимірюється багато різних типів випробуваних СД, потрібно мати багато різних типів еталонних СД. Крім того, все ще будуть деякі похибки спектральної невідповідності через малу різницю в спектральному розподілі між еталонним СД і випробуваним СД, які можуть бути оцінені як компоненти невизначеності.

### 9.11 Заміщення з меншою кількістю еталонів

У багатьох випадках виникає потреба випробовувати СД такої великої кількості типів і, відповідно, складно мати достатньо еталонних СД. У таких випадках описаний попередній метод не може бути застосованим. У цьому методі рекомендується, щоб калібрувальний еталон СД (який одержує одиницю від національної метрологічної лабораторії) вимірювався на кількох довжинах хвиль (кольорах) в умовах установки споживача, а результати порівнювалися за невизначеностями вимірювань.

### 9.12 Коригування в разі різниці у спектрах

Цей метод потребує знання відносної спектральної чутливості фотометричної головки. Фотометрична головка прокалібрована за еталонним СД певного кольору (наприклад зеленим або білим), і випробовувані СД будь-яких інших кольорів вимірюються з виправленням спектрального неспівпадіння відповідно до

$$I_{CBД, test} = F \frac{y_{test}}{y_{ref}} I_{CBД, ref}, \quad (9.29)$$

де  $F$  – спектральний коригувальний коефіцієнт неспівпадіння, обчислений для кожного випробуваного СД як

$$F = \frac{\int S_t(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int S_r(\lambda)S(\lambda)_{rel}d\lambda} \cdot \frac{\int S_t(\lambda)S_{rel}(\lambda)d\lambda}{\int S_r(\lambda)S_{rel}(\lambda)d\lambda} \quad (9.30)$$

де  $S_t(\lambda)$  – відносна густина спектрального розподілу променевого потоку випробуваного СД;

$S_r(\lambda)$  – відносний спектральний розподіл еталонного СД;

$S_{rel}(\lambda)$  – відносна спектральна чутливість фотометричної голівки;

$V(\lambda)$  – відносна спектральна світлова ефективність випромінювання для стандартного фотометричного спостерігача МКО.

Коефіцієнт  $F$  є коригувальним множником співвідношення значень вихідних сигналів голівки фотометра.

### 9.13 Використання спектро радіометра

Спектро радіометр можна використовувати замість фотометричної голівки для вимірювання усередненої сили світла СД, якщо спектро радіометр відповідно конструйований для СД-вимірювань.

#### Метод еталонного приймача

Замість того, щоб використовувати еталонні СД для калібрування фотометричної голівки, можна використовувати фотометр як еталон (названий еталонним фотометром), що є звичайною практикою в загальній фотометрії. Відібрані фотометри високої якості є стабільними протягом тривалого часу. Фотометрична голівка, яка має відповідну апертуру для усередненої сили світла СД, калібрується за чутливістю, за освітленістю [А/лк], за джерелом з еталонним спектром (еталонний випромінювач типу А) на відстанях, які відповідають умовам МКО А і В. Чутливості для умов МКО можуть дещо відрізнятися внаслідок ефекту ближнього поля. Таке калібрування фотометричної голівки можливе в національному метрологічному інституті НМІ, а також може бути виконане використовувачами калібруванням фотометричної голівки за еталонним СД, який калібрований у НМІ. Коли фотометрична голівка розміщена на точній відстані  $d$  (316 або 100 мм для умов МКО геометрії А і В), можна виміряти усереднену силу світла СД випробуваного СД так:

$$S_{СВД,А} = F \cdot d^2 \frac{y}{S_{СВД,А}}; d = 0,316\text{мм}, \quad (9.31)$$

$$S_{СВД,В} = F \cdot d^2 \frac{y}{S_{СВД,В}}; d = 0,100\text{мм}, \quad (9.32)$$

де  $y$  – сигнал фотометричної голівки;

$S_{СВД,А}$  і  $S_{СВД,В}$  – чутливість за освітленістю фотометричної голівки для умов МКО А і В;

$F$  – спектральний коригувальний фактор.

Спектральний коригувальний фактор  $F$  обчислюється за формулою (9.32). Відмінність цього методу від методу, описаного в розділі (9.12) полягає в тому, що за методом еталонного приймача шкала тримається на фотометричній голівці. Чутливість встановлюється тільки для одного еталонного джерела, і СД завжди вимірюються із застосуванням спектрального коригування. За цього методу дізнаємося відносну спектральну чутливість фотометричної голівки, також як і відносний спектральний розподіл потужності випробовуваних СД. Для підтримки спектральної характеристики фотометрична головка може періодично перекалібровуватись. Для застосування цього методу рекомендується, щоб необхідні калібровані еталонні СД (прокалібровані в НМІ) декількох кольорів, вимірювалися за допомогою установок споживачів і порівнювалися з результатами за невизначеностями вимірювань.

## 9.14 Вимірювання світлових потоків

### 9.14.1 Вимірювані величини

Термін «повний світловий потік» означає весь потік, утворюваний джерелом, тобто сумарний потік, що поширюється в усіх напрямках (у тілесному куті  $4\pi$  *ср*). Проте він не завжди є важливішою величиною, яка потрібна у використанні окремих СД. У деяких випадках є необхідним поняття часткового потоку, випромінюваного в межах певного тілесного кута, з нехтуванням потоком у непризначених напрямках (наприклад, у зворотному напрямку). Тому, окрім повного світлового потоку, в сфері випробувань СД з'явилася нова величина – «частковий світловий потік».

### 9.14.2 Повний світловий потік

Повний світловий потік є основним параметром джерел світла. Він визначається сукупним потоком джерел світла в тілесному куті  $4\pi$  *ср*. Повний світловий потік має позначення  $\Phi$  або  $\Phi_V$ , і одиницею його є люмен. Він визначається інтегралом від сили світла джерела по повному тілесному куті:

$$\Phi = \int_{\Omega} I \cdot d\Omega, \quad (9.33)$$

або інтегралом від освітленості, утворюваної джерелом на замкненій явній поверхні  $A$ , розташованій навколо джерела світла:

$$\Phi = \int_A E \cdot dA \quad (9.34)$$

Тому повний світловий потік має містити всі потоки, що утворюються в СД (зокрема й у зворотному напрямку).

### 9.14.3 Частковий потік світлодіодів

Частковий потік СД – величина, яка використовується для специфічних застосувань СД. Вона визначається як потік, що покидає СД і розповсюджується в межах заданого конусного кута (центрованого механічною віссю СД), який визначається круговою апертурою діаметром в 50 мм і відстанню, виміряною від голівки СД. Рисунок 9.15 ілюструє це визначення. Відстань  $d$  для конусного кута  $x^\circ$  дається:

$$d = \frac{25}{\operatorname{tg} x/2} \text{ [мм]}, \quad (9.35)$$

де  $x^\circ \leq x \leq 180^\circ$ .

Це величина має позначення  $\Phi_{\text{СД},x}$  зі значенням конусного кута  $x$  у градусах.

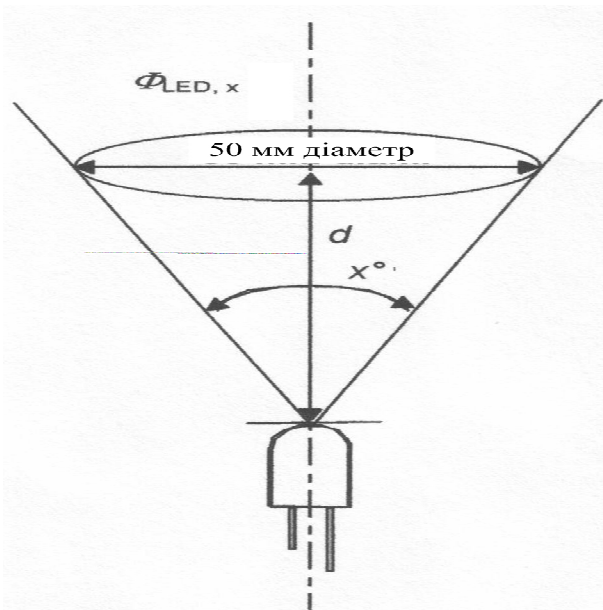


Рисунок 9.15 – Частковий потік СВД

Наприклад,  $\Phi_{\text{СД},180}$  відповідає потоку у фронтальній півсфері (передній потік), у разі якого  $d = 0$ . Будь-які частки (повного) потоку, що випромінюється поза показаним конусним кутом, ігноруються.

Базовою точкою СД є голівка, не тому що вона є його ефективним світловим центром, а тому, що її місце розташування можна легко визначити у СД, тоді як розташування світлового центру визначається складно, а інколи – взагалі невідоме. Це важливо для простоти вимірювань та відтворюваності їхніх результатів. Для цього також встановлено єдине значення діаметра апертур (50 мм) (результати вимірювань будуть різними за різних розмірів апертур, використовуваних з однаковими конусними кутами). Це не є реальним частковим потоком, визначеним у «дальньому полі», скоріше він називається частковим потоком СД, тобто

величиною, яка може використовуватися в практичних випробуваннях СД з простим оснащенням та відтворюваністю результатів.

Рекомендується, щоб поняття повного світлового потоку застосовувалося настільки, наскільки можливо. Поняття часткового потоку СД застосовується лише тоді, коли поняття повного потоку не достатнє у певних використаннях СД. У разі застосування часткового потоку СД рекомендується, щоб за можливості використовувалися кути:  $40^\circ$ ;  $60^\circ$ ;  $90^\circ$  та  $120^\circ$ . Використання багатьох різних кутів призведе до складнощів при порівнянні результатів. Крім того, перевага має надаватися куту, який вибирається так, щоб більша частина світлового пучка від СД містилася в цьому тілесному куті. Такі умови роблять вимірювання менш чутливими до похибок в орієнтуванні СД та у визначеннях відстаней вимірювань і діаметрів апертур.

У виробничому середовищі частковий потік СД може вимірюватися за умов модифікованих геометрій (менших діаметрів і відстаней). У таких випадках результати вимірювань можуть порівнюватися з результатами, одержаними за встановлених умов (з діаметром апертури 50 мм) або коригуватися згідно з результатами останніх на основі кореляції результатів за умов двох геометрій стосовно діодів певних типів з урахуванням додаткових невизначеностей.

## 9.15 Методи вимірювання потоку

Для вимірювання повного світлового потоку використовуються гоніометри або інтегрувальні сфери. Для вимірювань часткового потоку СД зазвичай використовуються інтегрувальні сфери.

### 9.15.1 Гоніометричний метод. Вимірювання повного світлового потоку

Гоніометр є приладом для вимірювання сили світла джерел (або освітленості від джерел на заданій відстані) в багатьох різних напрямках від джерела. На відміну від методу інтегрувальної сфери, гоніометричний метод теоретично вільний від похибок, пов'язаних із відмінністю в розподілі інтенсивності випробуваних джерел світла. Він не потребує еталонів повного світлового потоку. Замість цього він потребує більшого часу для вимірювань кожного зразка.

За допомогою вимірювання розподілу сили світла  $I(\theta, \phi)$  джерела повний світловий потік одержують за формулою:

$$\Phi = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_0^{\pi} I(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta d\phi. \quad (9.36)$$

Гоніометр може бути конфігурований у такий спосіб, щоб розподіл освітленості  $E(\theta, \phi)$  був вимірний по уявній сферичній поверхні радіуса  $r$ (м), замість того, щоб вимірювати силу світла. У цьому разі повний світловий потік визначають виразом

$$\Phi = r^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi E(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (9.37)$$

За рівнянням (9.37) можна визначити, що місце розташування джерела світла в уявній сфері не має значення.

Інтервал кутів вимірювання необхідно ретельно вибирати залежно від різкості діаграми пучка СД. У дійсності СД не є точковими джерелами й мають неоднорідний розподіл світла. Вимірювана відстань (радіус обертання фотометра) повинна бути вибрана досить великою (типово 300 мм або більше), такою, щоб похибки вимірювань відстані (зокрема похибка визначення положення базової площини фотометра), коли рівняння (8.35) використовується, або похибкою вирівнювання СД, коли рівняння (8.35) використовується, знехтували. Якщо гоніометр також сконструйований для вимірювання усередненої сили світла СД, відстань  $r$  може бути вибраною для умов  $A$  і  $B$  (100 або 316 мм). Необхідно зазначити, що кутова роздільна здатність за цих умов достатньо низька завдяки порівняно великому тілесному куту, за яким вимірюється потік.

Фотометрична голівка гоніометра повинна задовольняти вимоги щодо спектральної чутливості, наведені в розділі 9.6.3. Калібрування фотометричної голівки (і спектральне коригування) має відповідати рекомендації для вимірювань Усередненої сили світла (розділ 9.10). Прилад також потребує ретельного екранування від зовнішнього світла й відбитого світла всередині.

Діапазон кутового сканування повинен покривати весь тілесний кут, у якому випробуваний СД випромінює світло. Відзначимо, що деякі СД мають істотну величину випромінювання в оберненому напрямку, навіть тоді, коли вони мають вузьку пучкову діаграму в прямому напрямку. Таке випромінювання в оберненому напрямку має бути включене для визначення повного світлового потоку. Зазначимо, що деякі гоніометри можуть сканувати тільки в передній напівсфері; в такому разі будь-яке випромінювання в оберненому напрямку ігнорується, що призводить до похибки визначення світлового потоку.

## 9.15.2 Метод інтегрувальної сфери

### Вимірювання повного світлового потоку

Найпростіший шлях вимірювання повного світлового потоку СД – використання фотометра на базі інтегрувальної сфери. Це є прикладом того, як проводити оптичне просторове інтегрування потоку так, щоб повний світловий потік виміряти однією фіксованою фотометричною голівкою, і вимірювання є поточним. Фотометр на базі інтегрувальної сфери калібрується за еталонним повним світловим потоком. Джерело світла, яке випробовується, вимірюється порівнянням з еталонним джерелом, яке має подібні просторовий і спектральний розподіли. Отже, цей метод потребує еталонних СД, каліброваних за повним світловим потоком. Порівняно з гоніометром вимірювання є швидкими, але їм властиві похибки, коли просторові розподіли сили світла еталонного СД і випробуваного СД різні.

Цей тип похибки важливо коригувати, щоб похибку мінімізувати використанням добре сконструйованою конфігурацією сфери й подібним типом еталонних СД, таких як і випробуваний СД.

Рисунок 9.16 ілюструє рекомендовані конфігурації сфери для вимірювання повного світлового потоку СД.

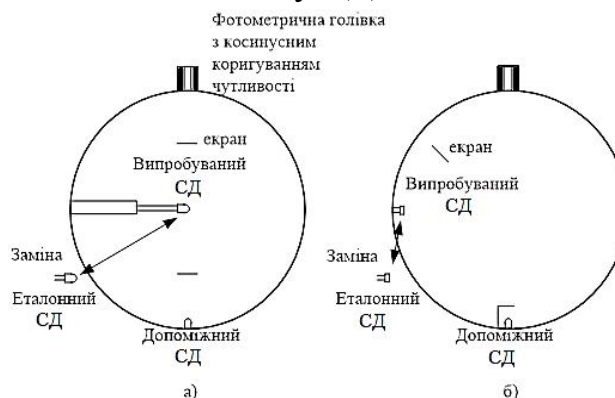


Рисунок 9.16 – Рекомендовані конфігурації сфери для світлового потоку СД:

а – для всіх типів СД, б – для СД з вимірюванням в оберненому напрямку

Конфігурація (а) рекомендується для всіх типів СД, зокрема ті, які мають профіль вузького світлового пучка або ті, які мають широкі діаграми й випромінювання в оберненому напрямку. Ці конфігурації сфери забезпечують хорошу просторову однорідність чутливості по всім стінкам сфери та є менш чутливими до відмінностей у просторовому розподілі сили світла СД. За старої практики випробуваний СД закріплювався на стінці сфери, що взагалі не рекомендується для вимірювань повного світлового потоку через втрату випромінювання в зворотному напрямку.



Проте конфігурація (б) прийнятна для СД, які не мають випромінювання в оберненому напрямку. Ця конфігурація має перевагу завдяки тому, що випробуваний СД можна легко закріпити на стінці сфери. Відзначимо, що СД на епоксидній основі можуть мати суттєві частки випромінювання в зворотному напрямку, і завдяки чому необхідно використовувати конфігурацію (а). Високопотужні СД, які мають великий тепловідвід і не мають зворотного випромінювання, можуть вимірюватись за конфігурацією (в), коли тільки СД – голівка вмонтовується в сферу, а великий тепловідвід залишається поза сферою.

Для будь-якої конфігурації для сфери рекомендується мінімальний діаметр – 20 см.

Для вимірювань СД зазвичай використовуються сфери діаметром від 20 см до 50 см. Чим більша сфера, тим менше похибок просторової неоднорідності (пов'язаних із порівняно меншим розміром екрана), а чутливості до самопоглинання менше, але й сигнал також зменшуються.

Високопотужні СД (наприклад такі, які споживають більше 1 Вт електричної енергії) можуть вимірюватися у великих інтегровальних сферах (наприклад, у сфері діаметром 2 м, яка використовується для вимірювань традиційних ламп), і в якій цілком СД і тепловідвід може бути вмонтовано в центрі сфери за конфігурацією (а).

Сфера повинна бути оснащена допоміжним СД. Вимірювання самопоглинання потрібно виконати, якщо випробовуваний і еталонні СД не є того самого типу й розміру (пряме заміщення) або розмір сфери не є досить великим, щоб самопоглинанням СД можна було знехтувати. Самопоглинання може бути різним для різних кольорів СД залежно від характеристик сфери. Краще використовувати допоміжний СД, який має подібний колір, як і випробуваний СД, якщо відмінності мають суттєвий характер.

Для внутрішнього покриття віддають перевагу матеріалам із коефіцієнтом відбиття від 90 % до 98 % залежно від розміру сфери та її використання. Чим більше значення коефіцієнта відбиття, тим більше отриманий сигнал і тим менші похибки, пов'язані з різницями в розподілах сил світла. Проте вища відбивальна здатність сфери більше залежить від ефектів самопоглинання, довгострокового дрейфу й відмінностей спектрального розподілу потужності. Розмір екрана повинен бути настільки малим, наскільки можливо захистити фотометр від прямого освітлення від еталонного та випробованого СД найбільших вимірюваних розмірів.

За будь-якої геометрії (а) або (б) важливо, щоб фотометрична голівка мала необхідну косинусну характеристику й узгодження відповідно до кривої

видності  $V(\lambda)$ . Вимоги до спектральної чутливості застосовуються в цілому до системи (фотометрична головка + інтегральна сфера).

Для методів коригування спектральної невідповідності, якщо таке коригування не здійснюється (див. розділ 9.15.6), потрібно провести пряме заміщення, коли випробувані СД порівнюються з еталонними СД того самого типу (приблизно того самого спектрального розподілу). Необхідно взяти до уваги, коли СД, які вимірюються, здатні генерувати флуоресценцію у сфері. Похибка може бути суттєвою, коли пікова довжина хвилі СД знаходиться на крилах  $V(\lambda)$  (наприклад сині СД), флуоресценція відбувається в зеленій області, де значення  $V(\lambda)$  є великим, у такому випадку ефект флуоресценції збільшується у вимірюваному світловому потоці.

### 9.15.3 Вимірювання часткових потоків СД

Для вимірювання часткових потоків СД рекомендується інтегральний сферичний фотометр із геометрією, зображеною на рисунку 9.17. Сфера має отвір, до якого припасовано прецизійну апертуру (діаметром 50 мм). Базова площа (площина, що проходить через призматичні краї) має розташовуватися на одному рівні з внутрішньою поверхнею сфери (так щоб в апертуру вписувалися повні конічні кути  $X$  у діапазоні від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ ). Площа апертури має бути виміряна зі сталою невизначеністю, оскільки це безпосередньо впливає на невизначеність вимірювань часткового потоку СД. Рекомендується, щоб сфера мала діаметр не менше 20 см. Перевага має надаватися покриттям внутрішньої поверхні кулі з високими рівнем відбиття (95–98 %) для збільшення вхідного сигналу та кращої просторової однорідності чутливості кулі, оскільки ефективність відбивань у кулі дещо зменшується через наявність великого отвору. Відстань  $d$  (від купола СД до базової площини в апертурі) визначається стосовно повного конусного кута  $X$  згідно з формулою (8.35).

Екран розташовується на середині відстані між отвором та фотометричною голівкою, і він має бути за можливості малим, але достатнім, щоб затінити фотометр (світлочутливу поверхню) в межах усього отвору апертури.

Простір навколо випробуваного СД та отвору має бути захищений від сторонніх випромінювань, і потрібно звертати увагу на те, щоб тільки пряме світло від випробуваного СД могло потрапляти в отвір без сторонніх випромінювань та/або випромінювань, що відбиваються від інших об'єктів навколо СД.

Значення параметрів випробуваних СД знаходять шляхом порівняння зі значеннями параметрів еталонних СД тих самих типів. Рекомендується використовувати еталонні СД з подібними розподілами інтенсивності, оскільки це усуває або зменшує різні похибки, пов'язані, наприклад, зі сторонніми випромінюваннями, вимірюванням відстані  $d$  та площі  $A$  апертури.

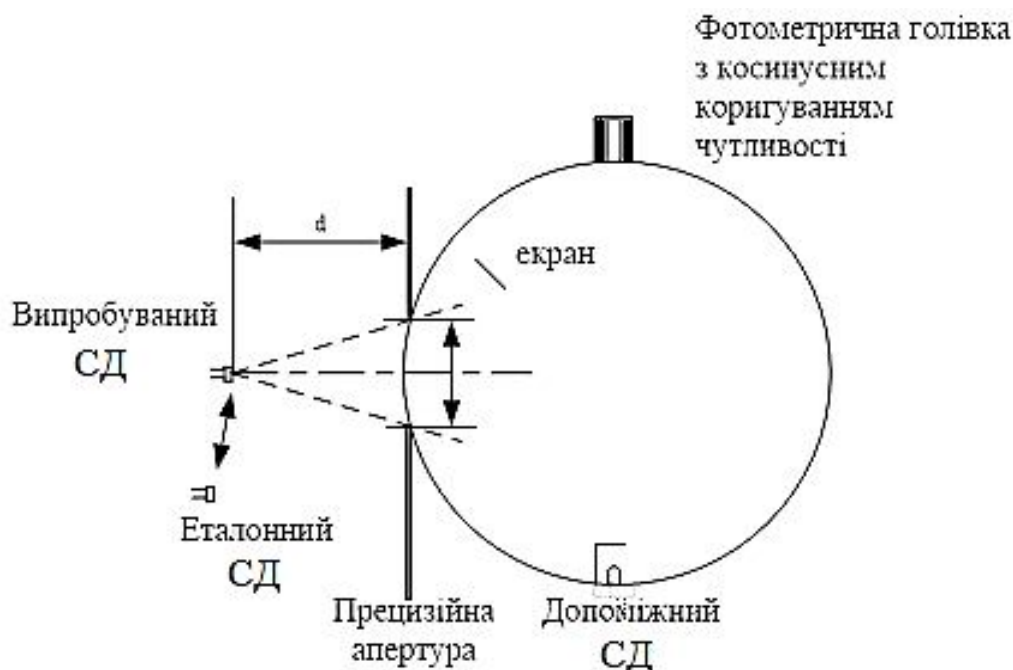


Рисунок 9.17 – Рекомендована геометрія сфери для вимірювань Часткового потоку СД

#### 9.15.4 Методи калібрування сфери та подальші коригування

Коли проводяться вимірювання випробуваного СД певного кольору (спектрального розподілу), фотометр на базі інтегрувальної сфери калібрується за еталонним СД того самого кольору (або приблизно того ж самого спектрального розподілу). Коли вимірюється випробуваний СД іншого кольору, сферичний фотометр калібрується за іншим еталонним СД того самого кольору. За таким методом прямого заміщення немає необхідності спектрального коригування, і вимірювання є найпростішим. Проте, якщо є багато різних типів (кольорів) випробуваних СД, необхідно мати також багато інших еталонних СД. Також зазначимо, що навіть при такому прямому заміщенні похибки спектральної невідповідності не будуть дорівнювати нулю через малу різницю в спектральному розподілі між еталонним і випробуваним СД, і ці похибки повинні бути оцінені як складник невизначеності. Повинні бути використані допоміжні лампи для визначення самопоглинання у тих випадках, коли випробувані СД відрізняються від еталонного СД, тоді як колір і

просторовий розподіл є неістотними: під час роботи допоміжного СД випробуваний СД виключається. Важливо те, що ці два світлодіода є різними, так що їх поглинання відрізняються.

#### 9.15.5 Заміщення з меншою кількістю еталонів

У багатьох випадках, коли вимірюється багато різних типів (колірності) СД, важко забезпечити такою кількістю еталонних СД. У таких випадках рекомендується метод, описаний у розділі 9.15.6. А ще рекомендується, щоб еталонні СД певних кольорів калібруються в НМІ, вимірювались із використанням установок споживача, і результати порівнювались для узгодження результатів у межах встановлених невизначеностей для кожного колірної СД.

##### 9.15.5.1 Використання сферичного фотометра з хорошим спектральним узгодженням

Якщо величина  $f_{1,СВД}$  сферичного фотометра досить мала ( $<10\%$ ) і прийнятна як додатня невизначеність, тоді фотометрична голівка калібрується еталонним СД певного кольору (зеленим, білим тощо) і випробувані СД будь-яких інших кольорів вимірюються без коригування на спектральну відмінність. Значення  $f_{1,СВД}$  береться як додатна компонента невизначеності у вимірюваннях.

Зазначимо, що відносна спектральна чутливість сферичного фотометра складається зі спектральної чутливості фотометричної голівки та спектральної пропускної здатності сфери.

##### 9.15.6 Застосування коригувань, пов'язаних з різницею в спектрах невідповідності

Якщо відносна спектральна чутливість сферичного фотометра відома, сферичний фотометр калібрується за еталонним СД певного кольору (зелений, білий тощо), тоді випробувані СД будь-якого кольору вимірюються із застосуванням спектрального коригування. Якщо відносний спектральний розподіл випробуваного СД невідомий, його необхідно виміряти. Коефіцієнт спектрального коригування обчислюється за рівнянням (9.30), з  $S_{rel}(x)$ :

$$S_{rel} = S_{ph\ rel}(\lambda) \cdot T_{rel}(\lambda), \quad (9.38)$$

де  $S_{ph\ rel}(\lambda)$  – відносна спектральна чутливість фотометричної головки;

$T_{rel}(\lambda)$  – відносний спектральний коефіцієнт пропускання інтегруючої сфери.

### 9.15.7 Вимірювання відносного спектрального коефіцієнта пропускання

Відносний спектральний коефіцієнт пропускання  $T_{rel}$  інтегровальної сфери вимірюється з використанням таких методів:

1. Для вимірювання повного потоку спочатку вимірюють спектральний розподіл еталонної вольфрамової лампи всередині сфери за допомогою спектрорадіометра. Вимірюючи в кількох різних напрямках, перевіряють, що лампа має просторово однорідний спектральний розподіл. Спектрорадіометр повинен бути в режимі опроміненості й мати косинусне коригування чутливості. Тоді вмикають лампу в сфері та вимірюють спектральний розподіл на приймальному порті (захищеному від прямого світла), використовуючи той самий спектрорадіометр. Співвідношення виміряного спектрального розподілу всередині сфери до даних зовні сфери дасть відносний спектральний коефіцієнт пропускання сфери.

2. Використовуючи інтегровальну сферу для вимірювання часткового потоку СД, введемо пучок світла від еталонної вольфрамової лампи. Вимірюємо спектральний розподіл лампи спектрорадіометром (у режимі опромінення) в напрямку вхідного отвору. Потім вимірюємо спектральний розподіл на приймальному порті інтегровальної сфери, використовуючи той же самий спектрорадіометр. Співвідношення виміряного спектрального розподілу на приймальному порті сфери до даних, виміряних прямо від лампи, дасть відносний спектральний коефіцієнт пропускання сфери.

Зауважимо, що цей метод чутливий до похибок, якщо сфера має неоднорідне покриття і/або має флуоресценцію. Вольфрамова лампа, яка використовується при вимірюваннях, має бути достатньо малою відносно розміру сфери (наприклад, мініатюрна вольфрамова галогенна лампа може бути в сфері 20 см).

Визначити коефіцієнт пропускання сфери  $T_{rel}(\lambda)$  можна також за допомогою формули:

$$T_{rel}(\lambda) = \kappa \frac{\rho(\lambda)}{1-\rho(\lambda)}, \quad (9.39)$$

де  $\rho(\lambda)$  – спектральний коефіцієнт відбиття покриття сфери;

$\kappa$  – нормуючий множник.

Зазначимо, що з часом покриття забруднюється. Отже, обчислені результати від даних зразка покриття можуть не бути точними для фактичних інтегровальних сфер.  $\rho(\lambda)$  потрібно вимірювати в геометрії напівсферової

опроміненості. Крім того, через зменшення  $1 - \rho(\lambda)$  вимірювальні похибки в  $\rho(\lambda)$  мають тенденцію збільшуватись.

### 9.15.8 Використання спектро радіометра

Спектро радіометр може бути використаний як приймач для інтегрувальної сфери, і повний світловий потік може бути виміряний без коригування на спектральну невідповідність, якщо спектро радіометр налаштовано для вимірювання повного спектрального розподілу промененого потоку СД (див. розділ 9.16.12 )

## 9.16 Спектральні вимірювання. Концепція спектрального розподілу. Спектральна густина

Для будь-якої заданої радіометричної величини  $X_e$  спектральна густина цієї величини є похідною від цієї величини по довжині хвилі  $\lambda$  і задана формулою:

$$X_\lambda(\lambda) = \frac{dX_e(\lambda)}{d\lambda}, \quad (9.40)$$

де  $X_\lambda(\lambda)$  також відома як спектральний розподіл цієї величини. Ця функція залежить від довжини хвилі.

Одиницею спектро радіометричної величини є одиниця радіометричної величини, поділена на одиницю довжини, метр.

Наприклад, розмірність одиниці сили випромінювання  $I_e$  – Вт/ср, а розмірність одиниці спектральної сили випромінювання –  $I_{e\lambda}$ , яке часто записується просто як  $I_\lambda$ , є Вт/ср·м<sup>2</sup>, а для забезпечення зручнішого діапазону величин часто записується як мВт/ср нм або мкВт/ср нм.

Примітка. Спектральну густину можна виразити як функцію частоти або хвильового числа, проте зазвичай вибирається функція довжини хвилі, щоб охарактеризувати спектральний розподіл СД. Контур спектрального розподілу буде істотно змінюватись залежно від використовуваної ширини смуги спектро радіометра. Ширина смуги на половині максимуму інтенсивності (FWHM – full width at half maximum), яка використовується при вимірюванні, і будь-яке коригування на нульову ширину діапазону потрібно відмітити, коли відомі дані про спектральний розподіл. Ширина смуги не повинна перевищувати 5 нм.

### 9.16.1 Нормувальний коефіцієнт і відносна густина спектрального розподілу

Світлодіоди має оптичне випромінювання в обмеженому діапазоні довжин хвиль  $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ . Часто корисно нормувати функцію спектрального

розподілу й розділити її на дві частини, абсолютний коефіцієнт нормування взяти на довжині хвилі  $\lambda = \lambda_0$  в одиниці густини спектрального розподілу:

$$X_{e0} = X_\lambda(\lambda_\lambda = \lambda_0) \quad (9.41)$$

і відносну густину спектра  $S_\lambda(\lambda)$ :

$$S_\lambda(\lambda) = \frac{X_\lambda}{X_e}(\lambda), \quad (9.42)$$

яка є безрозмірною величиною, асоціюється з геометричним змістом розподілу, що характеризує первісну величину. Із рівняння (8.42) абсолютний спектральний розподіл можна записати як

$$X_\lambda(\lambda) = X_{e0} S_\lambda(\lambda). \quad (9.43)$$

### 9.16.2 Параметри спектральних розподілів

Рисунок 9.18 ілюструє положення характерних довжин хвиль, описаних у наступних розділах. Характер розподілу є типовим для всіх СД з нульовими значеннями за межами діапазону довжини хвиль  $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$  і одним суттєвим максимумом у ньому.

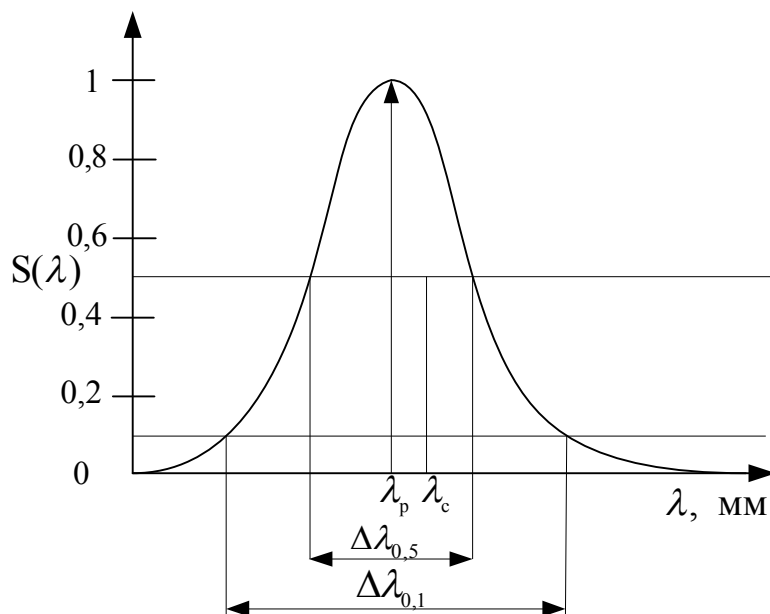


Рисунок 9.18 – Типовий відносний спектральний розподіл СД, який показує положення характерних довжин хвиль та інтервалів довжин хвиль

### 9.16.3 Пікова довжина хвилі

Довжина хвилі в максимумі спектрального розподілу відома як пікова довжина хвилі  $\lambda_p$ . Абсолютний спектральний розподіл переважно нормується



на цій довжині хвилі краще, ніж на будь-якій іншій хвилі, для того щоб одержати відносний спектральний розподіл із максимальним значенням, який дорівнює одиниці.

#### 9.16.4 Спектральна ширина смуги на рівні половини максимуму інтенсивності

Ширина спектральної смуги на рівні половини максимуму інтенсивності обчислюється за двома довжинами хвиль  $\lambda'_{0,5}$  і  $\lambda''_{0,5}$ , які перебувають з обох боків від  $\lambda_p$ , і на яких інтенсивності становлять 50 % максимальної:

$$\Delta\lambda_{0,5} = \lambda''_{0,5} - \lambda'_{0,5}. \quad (9.44)$$

Примітка. У деяких областях застосування також використовується значення  $\Delta\lambda_{0,1}$  (див. рис. 9.18), ширина діапазону визначається між двома довжинами хвиль, на яких інтенсивності становлять 10 % максимальної.

#### 9.16.5 Центральна довжина хвилі між половинними рівнями

Довжина хвилі посередині двох обмежувальних довжин хвиль  $\lambda'_{0,5}$  і  $\lambda''_{0,5}$  спектральної смуги, на яких інтенсивності становлять 50 % встановленого рівня, обчислюється за допомогою формули:

$$\lambda_{0,5} = \frac{1}{2} (\lambda'_{0,5} + \lambda''_{0,5}). \quad (9.45)$$

#### 9.16.6 Центроїдна довжина хвилі

Центроїдна довжина хвилі  $\lambda_c$ , що (як абсциса) відповідає розташуванню центра ваги «спектрального розподілу» і значення якого обчислюється за формулою:

$$\lambda_c = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda S_X(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_X(\lambda) d\lambda}. \quad (9.46)$$

Необхідно зазначимо, що, на відміну від інших характерних довжин хвиль, визначених тут, центроїдна довжина хвилі може сильно залежати від дуже малих значень відносного спектрального розподілу на спадаючих «хвостах» кривої, де невизначеність вимірювання збільшується завдяки впливу розсіяного випромінювання, шумових ефектів, дрейфу підсилювача.

#### 9.16.7 Колометричні величини, які визначаються за спектральним розподілом

Рисунок 9.19 ілюструє концепції домінантної довжини хвилі та чистоту стимулу.

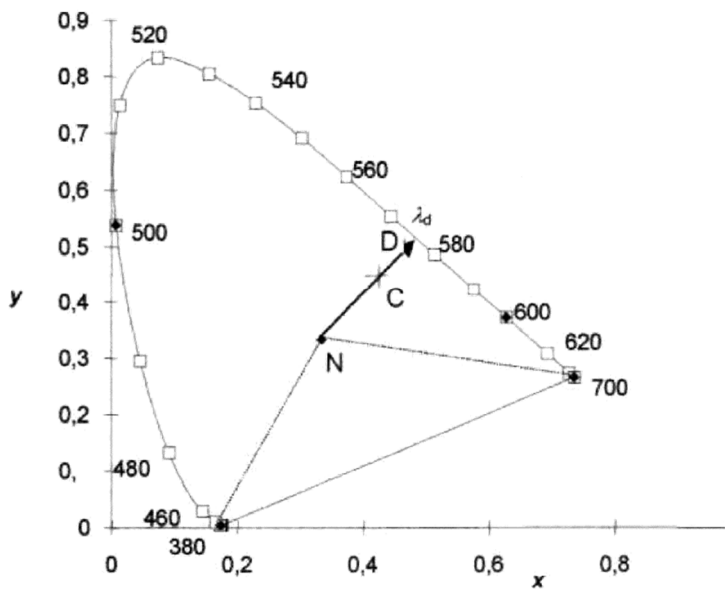


Рисунок 9.19 – Колірний графік МКО 1931 р., на якому показано точки та відрізки для обчислень значень домінантної довжини хвилі та частота

колірності. Білі СД характеризуються корельованою колірною температурою.

Колір світла, який випромінюється СД, може бути визначений у термінах координат колірності й він найкраще отримується обчисленням за спектральним розподілом. Дві альтернативні величини також інколи використовуються, щоб охарактеризувати колір одноколірних СД домінантна довжина хвилі та чистота (колірного стимулу), вони не можуть використовуватись для білих СД. Їх застосовують і для представлення кількісної міри відтінку й насиченості кольору, обчислюють за координатами

#### 9.16.8 Домінантна довжина хвилі

Домінантна довжина хвилі  $\lambda_d$  колірного стимулу визначається в такий спосіб. Довжина хвилі монохроматичного стимулу, коли адитивно змішаний у необхідних пропорціях із визначеним ахроматичним стимулом узгоджує розглянутий колірний стимул.

Значення  $\lambda_d$  домінантної довжини хвилі колірного стимулу знаходиться так: стосовно колірного стимулу визначається довжина хвилі монохроматичного стимулу для адитивного змішування в належних пропорціях з установленим ахроматичним стимулом.

Базовим ахроматичним стимулом для характеристик СД має бути стимул з еквиенергетичним спектром, тобто такий стимул, функція густини спектрального розподілу якого (від довжини хвилі) є константа (яку іноді називають стандартним джерелом (ілюмінантом) E) і який має координати колірності  $x_e = 0,3333$  та  $y_e = 0,3333$ .

### 9.16.9 Чистота (колірного стимулу)

Для характеристики чистоти вимірювання СД застосовується параметр  $p_e$  – умовна чистота кольору. Його значення знаходиться нижче наведеним способом.

Обчислюється відношення  $NC/ND$  двох колінеарних відрізків на колірному графіку стандартної колориметричної системи СІЕ 1931 р. (графік 1964 р. дає більш різні значення в разі малих насиченостей); перший відрізок – відрізок між точкою  $C$ , яка представляє розглядааний колірний стимул і точкою  $N$ , яка представляє встановлений ахроматичний стимул; другий відрізок – між точкою  $N$  і точкою  $D$  на лінії спектральних колірностей, що відповідає значенню домінантної довжини хвилі розглядаємого стимулу.

Визначення приводить до таких виразів:

$$p_e = \frac{y - y_n}{y_d - y_n} \quad \text{або} \quad p_e = \frac{x - x_n}{x_d - x_n}, \quad (9.47)$$

де  $(x, y)$ ,  $(x_n, y_n)$ ,  $(x_d, y_d)$  – координати кольоровості точок  $C$ ,  $N$  і  $D$  відповідно.

Примітка. Значення умовної чистоти кольору дорівнює одиниці, якщо точка, що відповідає колірності випробуваного СД перебуває на лінії спектральних колірностей і дорівнює нулю, якщо вона має ті самі колірні координати, що й встановлений ахроматичний стимул.

### 9.16.10 Спектральні вимірювання СД

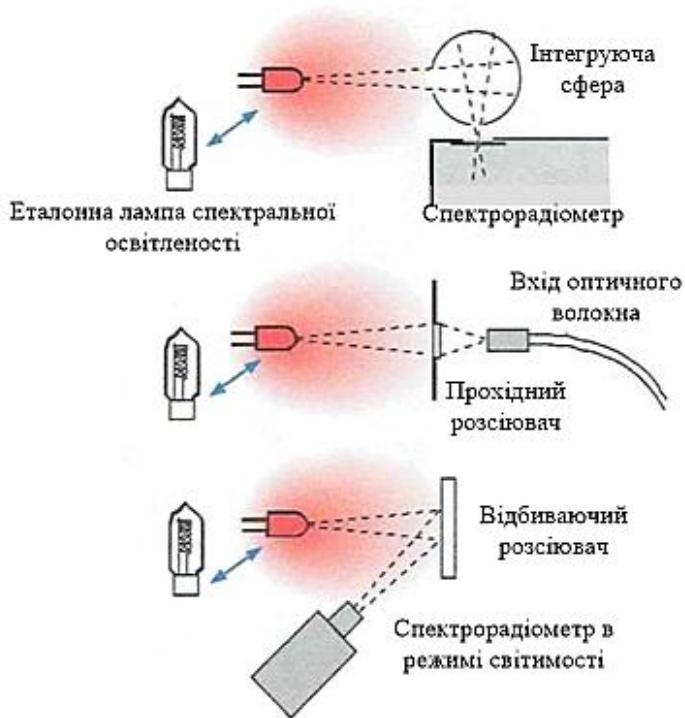
Загальні настанови щодо спектральних вимірювань параметрів джерел світла надаються в [5]. У цьому розділі розглядаються вимоги до спектро радіометрів спеціально призначених для вимірювань параметрів СД. Параметри спектральних розподілів і колірні параметри СД можуть вимірюватися за допомогою спектро радіометрів у чотирьох різних режимах, а саме в режимах вимірювань:

- 1) опроміненості;
- 2) повного потоку;
- 3) часткового потоку;
- 4) енергетичної яскравості.

У режимі вимірювань опроміненості знаходяться значення параметрів спектрального розподілу та колірних параметрів СД в одному напрямку випромінювання, тоді як у режимі вимірювань повного потоку знаходяться їхні середні значення за всіма напрямками. Режим вимірювань часткового потоку займає середнє положення. У режимі вимірювань енергетичної яскравості значення функції спектральної яскравості – з

використанням у фотометрії оптики формування зображень. Режим вимірювань опроміненості може застосовуватися для більшості одноколірних СД, які мають рівномірні просторові розподіли кольору. Білим СД властиво мати нерівномірні просторові розподіли кольорів, тому в таких випадках рекомендуються режими вимірювань повного або часткового потоку для

знаходження усереднених колірних параметрів.



#### 9.16.11 Режим вимірювання опроміненості

Вимірювання проводяться в межах малого тілесного кута в променевому потоці від випробуваного СД, що поширюється в одному напрямку. На рисунку 9.20 наведено деякі приклади вхідної геометрії стосовно пристроїв режиму вимірювань опроміненості.

Рисунок 9.20 – Приклади вхідних геометрій спектрорадіометра в режимі вимірювання опроміненості

Спектрорадіометр калібрується за допомогою еталонної спектральної лампи (зазвичай кварцевої вольфрамowo-галогенної). Важливо, щоб

випромінювання від еталонної лампи та СД вводилися в спектрорадіометр (вхідна щілина або світловід) точно з однаковими просторовими та кутковими розподілами та за однакових умов поляризації. Варто зазначити, що випромінювання вольфрамових ламп є дещо поляризованими. Для досягнення цього як вхідна оптика необхідні або мала інтегруювальна сфера (наприклад, діаметром 50 мм), або розсіювач. Така вхідна оптика має забезпечувати просторову та кутову рівномірність освітлення дисперсійного пристрою незалежно від виду джерела та розподілу інтенсивності його випромінювання.

Тому СД і еталонна лампа можуть різнитися в розмірах і розташовуватися в різних положеннях щодо однаковості рівнів сигналів.

Серед прикладів, наведених на рисунку 9.20, використання інтегруювальної сфери (без обмежень геометрії, показаної на рисунку) є найбільш рекомендованим стосовно будь-якого спектрорадіометра завдяки

найвищій чутливості. Якщо висока чутливість не потрібна, може використовуватися відбивальний розсіювач. У разі використання розсіювача (особливо, якщо разом зі світловодною оптикою) потрібно обережно ставитися до просторової нерівномірності опромінювальної чутливості поверхні розсіювача. Він може бути непридатним для випромінювань середніх сил світла СД, якщо просторова однорідність чутливості є недостатньою (див. підрозділ 8.6.2). Розсіювачі з недостатньою просторовою чутливістю можна використовувати тільки тоді, коли він рівномірно освітлюється випробуваним джерелом. Використання вхідної світловодної оптики без розсіювача не повинне практикуватися навіть для вимірювань параметрів однокольорових СД, оскільки вимірювання будуть чутливими до кутових розмірів пучків, а тому і до розмірів джерел. Для вимірювань кольірних параметрів типових СД значення пучків мають вибиратися в межах  $(10 \pm 5)^\circ\text{C}$  або менших. Якщо рівні сигналів є достатніми, рекомендується використовувати геометрії за умов *A* або *B* МКО (див. підрозділ 9.8). Для вимірювань середніх сил світла СД розміри апертур мають вибиратися такими, що відповідають геометрії за умов *A* або *B* МКО.

#### 9.16.12 Вимірювання усередненої сили світла світлодіодів

Якщо спектро радіометр у режимі вимірювання освітленості налагоджено на геометрії за умов *A* або *B* МКО і відградує за абсолютними значеннями густини спектрального розподілу опроміненості, шукані значення параметрів СД можуть виражатися через значення функції  $E(\lambda)$  спектральної опроміненості (яка вимірюється у  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{нм}^{-1}$ ). Через них і значення відстані  $d$  (у метрах) від місця розташування СД (100 або 316 мм) значення  $I_{\text{СД}}$  середньої сили світла СД може бути знайдене за допомогою формули:

$$I_{\text{СД}} = d^2 K_{\text{max}} \int E(\lambda) V(\lambda) d(\lambda), \quad (9.48)$$

$$K_m = 683 \text{ лм/Вт.}$$

У разі застосування цього методу результати можна перевірити шляхом вимірювання параметрів еталонних СД різних кольорів. Якщо одержані значення перебувають у межах установлених невизначеностей, вони приймаються без коригувань. Відхилення, більші за сумарних невизначеностей із коефіцієнтом охоплення  $k = 2$ , можуть вважатися такими, що не відповідають запасам невизначеностей і мають бути проаналізовані [6]. За бажанням може використовуватися тільки відносне спектральне градування, а шкала абсолютних значень може надаватися за еталонними СД.

Вимірюються (просторово) усереднені параметри спектрального розподілу випробуваного СД. Цей режим зазвичай використовується для вимірювань параметрів спектральних розподілів і колірних параметрів розрядних ламп загального освітлення, оскільки вони мають просторово нерівномірні розподіли кольорів. У цьому режимі у разі градування в абсолютних одиницях перебувають значення густини спектрального розподілу повного променевого потоку джерела (у  $\text{Вт}\cdot\text{нм}^{-1}$ ). Приклад геометрії для вимірювань повних потоків подано на рисунку 9.21.

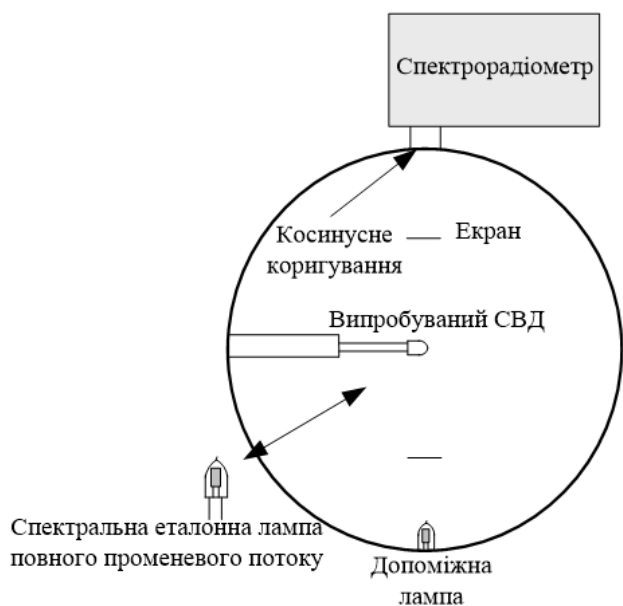


Рисунок 9.21 – Приклад геометрії спектрорадіометра в режимі вимірювань повного потоку

Сфера має ту саму геометрію, що й куля для вимірювань повних світлових потоків, із заміною фотометра на спектрорадіометр. Еталонний СД також замінено еталонною лампою. Спектральні складники променевого потоку інтегруються в повному тілесному куті  $4\pi$  *ср.* Така система (спектрорадіометр із кулею) градується за значеннями густини спектрального розподілу променевого потоку еталонної (зазвичай вольфрамової) лампи.

#### 9.16.12 Вимірювання повних світлових потоків

Якщо спектрорадіометр у режимі вимірювань повного потоку відградуваний за абсолютними значеннями густини спектрального розподілу повного променевого потоку, шукані значення параметрів випробуваних СД можуть виражатися через значення функції  $\Phi(\lambda)$  повного спектрального променевого потоку (яка вимірюється у  $\text{Вт}\cdot\text{лм}^{-1}$ ). Через них значення повного світлового потоку можна знайти за допомогою формули:

$$\Phi_v = K_m \int \Phi(\lambda) V(\lambda) d(\lambda), \quad (9.49)$$

$$K_m = 683 \text{ лм/Вт.}$$

У разі застосування цього методу результати необхідно перевірити шляхом вимірювання параметрів еталонних СД різних кольорів. Якщо одержані значення перебувають у межах установлених невизначеностей, вони

приймаються без коригувань. Відхилення, що перевищують сумарні невизначеності із коефіцієнтом охоплення  $k = 2$ , можуть вважатися такими, що не відповідають записам невизначеностей і мають бути проаналізовані, і за бажанням можна використовувати тільки відносне спектральне градування, а шкала абсолютних значень може надаватися за еталонними СД. Узагалі, як основна процедура, має проводитися градування, яке призводить до найменших невизначеностей.

#### 9.16.13 Режим часткового потоку

Спектрорадіометр може також використовуватися в режимі вимірювань часткового потоку. На рисунку 9.22 наведено приклад такої геометрії.

Це така сама геометрія, що й геометрія сфери для вимірювань часткових світлових потоків СД (рис. 9.22) із заміною головки фотометра спектрорадіометром. Такі рекомендації щодо конструкції сфери, як надані в підпункті 9.15.3, застосовуються лише тоді, коли не є критичними вимоги до апертури й коли за допомогою цього пристрою знаходяться лише відносні значення параметрів спектральних розподілів. Система інтегрувальної сфери зі спектрорадіометром може градуватися (за спектром) за допомогою еталонної лампи спектральної освітленості. Робоча еталонна лампа розташовується поза сферою на тій самій відстані, з якої проводилось градування спектральної освітленості. Еталонні лампи зазвичай градууються на відстанях від 50 мм до 70 мм.

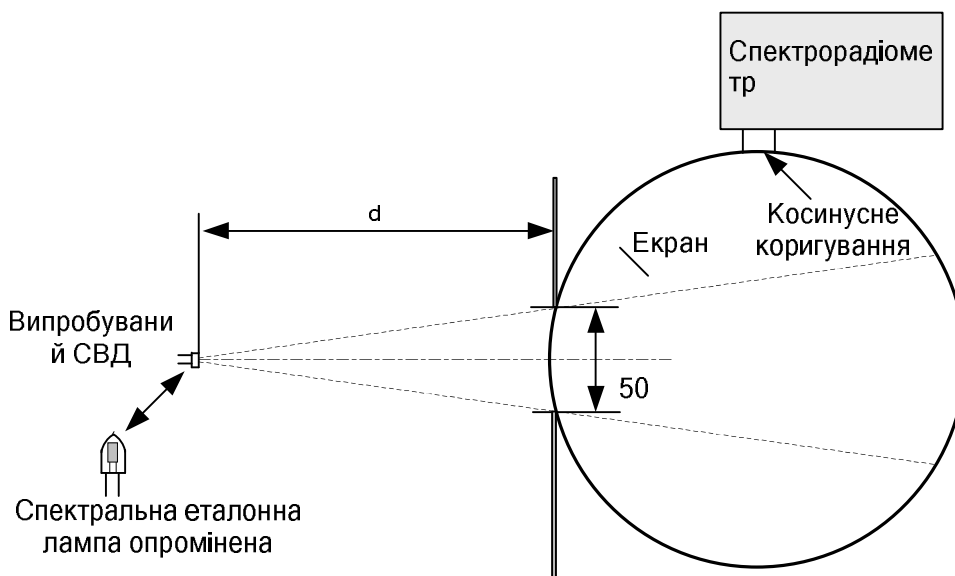


Рисунок 9.22 – Приклад геометрії спектрорадіометра в режимі вимірювань часткового потоку

Якщо значення (в метрах) площі  $A$  апертури є відомим, функція  $\Phi_{306}(\lambda)$  (у  $\text{Вт}\cdot\text{нм}^{-1}$ ) спектральної густини променевого потоку, що вводиться в сферу,



виражається через функцію  $E(\lambda)$  спектральної густини опроміненості (яка вимірюється у  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$ ) за допомогою формули:

$$\Phi_{\text{зовн}} = k_a A E(\lambda), \quad (9.50)$$

де  $k_a$  – коефіцієнт коригування опроміненості, усередненої у сфері малої площі, в межах якої опроміненість градувалася по лампі.

Еталонні лампи спектральної опроміненості зазвичай градуються за значно менших кутів пучків (а тому й менших площин). Значення  $k_a$  можна знайти за допомогою побудови просторової діаграми розподілу освітленості, утвореної лампою в межах площі, що відповідає отвору в кулі. У разі вимірювань параметрів тільки відносного спектрального розподілу (наприклад колірних параметрів) параметрами  $k_a$  та  $A$  можна практично знехтувати.

#### 9.16.14 Вимірювання часткових світлових потоків СД

Якщо спектро радіометр у режимі вимірювань часткового потоку відградувано за абсолютними значеннями густини спектрального розподілу променевого потоку  $\Phi_{\text{зов}}(\lambda)$ , шукані значення параметрів випробуваних СД можуть виражатися через значення функції  $\Phi_{e, \text{СД}, x}(\lambda)$  (яка вимірюється у  $\text{Вт} \cdot \text{нм}^{-1}$ ); через них значення часткового світлового потоку СД (в люменах) можна знайти за допомогою формули:

$$\Phi_{\text{СД}, x} = K_{\text{max}} \int \Phi_{e, \text{СВД}, x} V(\lambda) d(\lambda), \quad (9.51)$$

$$(K_m = 683 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}).$$

У разі застосування цього методу результати можна перевірити шляхом вимірювання параметрів еталонних СД різних кольорів. Якщо одержані значення перебувають у межах установлених невизначеностей, вони приймаються без коригувань. Відхилення, що перевищують сумарні невизначеності із коефіцієнтом охоплення  $k = 2$ , можуть вважатися такими, що не відповідають записам невизначеностей і мають бути проаналізовані, за бажанням може використовуватися тільки відносне спектральне градування, а шкала абсолютних значень може надаватися за еталонними СД. Узагалі, як основна процедура, має проводитися градування, яке призводить до найменших невизначеностей.

#### 9.16.15 Узгодження між смугою пропускання та інтервалом вимірювань

Під час проведення спектральних вимірювань можуть виникати похибки, пов'язані як зі смугою пропускання спектро радіометра, так і з

розміром інтервалу вимірювань [70]. Такі похибки є суттєвими в разі СД з вузькоспрямованими випромінюваннями. Щілина спектрорадіометра має властивість розширювати вимірювальний відрізок спектра, що призводить до похибок у знаходженні значень колірних параметрів. Наприклад, смуга пропускання в 10 нм спричинить похибку в мінус 0,003 в координатах колірності ( $u'$ ;  $v'$ ) у разі червоних та білих СД і мінус 0,002 – в разі зелених. Такі похибки, обумовлені щілиною спектрорадіометра, є пропорційними квадрату її збільшення. У разі смуги пропускання в 5 нм похибка в координатах ( $u'$ ;  $v'$ ) буде меншою за 0,001 у СД будь-якого кольору. У практичних вимірюваннях параметрів СД смуга пропускання в 5 нм є прийнятною та рекомендованою. Смуги пропускання більші ніж 5 нм, зазвичай не рекомендуються в разі вимірювань параметрів СД, але могли б використовуватися з відповідними коригуваннями, пов'язаними зі смугами пропускання.

Розмір інтервалу вимірювань також спричинює похибки, проте істотно менші, ніж пов'язані зі смугою пропускання. Наприклад, у разі інтервалу вимірювань у 10 нм (за смуги пропускання 5 нм) похибка в координатах ( $u'$ ;  $v'$ ) у типових СД становить менше 0,000 5, а в разі інтервалу в 5 нм – менше 0,000 01). Проте в колориметрії розрядних ламп прийнято узгоджувати розміри смуг пропускання та інтервалів вимірювань; у колориметрії СД неузгодженості призводять до негативних наслідків. Скоріше, менші смуги пропускання є важливішими за певних інтервалів вимірювань. Проте розміри інтервалів вимірювань є важливими для одержання значень таких параметрів, як довжина хвилі, що відповідає максимуму, та ширина спектра (параметри форми спектра) СД. Якщо вимірюються лише колірні параметри, достатньо прийнятним є інтервал вимірювань у 5 нм (і менше). Для визначення довжини хвилі, що відповідає максимуму та ширині спектра, рекомендується інтервал у 2,5 нм і менше. Зазначене вище (наприклад, інтервал – 2,5 нм, смуга – 5 нм) є найсприятливішим при вимірюваннях колірних параметрів, оскільки в разі такої смуги пропускання зменшуються похибки, пов'язані як із випадковими шумами, так і з зазначеними вище чинниками.

Оскільки розміри смуг пропускання та інтервалів вимірювань є фіксованими та не змінюються в багатьох приладах, що надходять у продаж (наприклад у діодно-матричних), ці параметри є вибірковими в більшості приладів із механічним установленням інтервалів. Для зменшення похибок бажаними є менші смуги пропускання, але при цьому зменшуються рівні сигналів. Бажаними є й менші інтервали, але вимірювання потребують більше часу. Тому значення цих параметрів установлюються залежно від інтенсивності СД та бажаних значень невизначеностей вимірювань.

### 9.16.16 Коригування, пов'язані зі смугами пропускання

Для прецизійних вимірювань, або, якщо ширина смуги пропускання більша ніж 5 нм (але не більше ніж 10 нм), рекомендується корегування відносно смуги пропускання. Метод Стірнса і Стірнса [8] (С-С метод) є дуже простим у застосуванні та дуже ефективним. Для застосування С-С метода необхідно, щоб функція пропускання була трикутною й ширина смуги пропускання  $\Delta\lambda_{0,5}$ , інтервал вимірювань  $\Delta\lambda_{step}$  були узгоджені ( $\Delta\lambda_{0,5} = n\Delta\lambda_{step}$ ,  $n$  – ціле число). Наприклад, для ширини смуги пропускання 5 і 5 нм інтервалу сканування скоригована спектральна величина  $S_i$ , яка обчислюється із дійсних значень сусідніх 5 точок у такий спосіб:

$$S'_i = \frac{(S_{i-2} - 12S_{i-1} + 120S_i - 12S_{i+1} + S_{i+2})}{98}, \quad (9.52)$$

де значення  $S_{i-2}, S_{i-1}, S_i, S_{i+1}, S_{i+2}$  відповідають, наприклад, значенням 440, 445, 450, 455 і 460 нм. Похибка, пов'язана зі смугою пропускання, буде усунута, якщо фізичні вимоги щодо смуги пропускання виконуються точно.

Існують покращені методики, які можуть застосовуватися до смуг пропускання з нетрикутниками функціями й не потребують узгоджень між смугами пропускання та інтервалами вимірювань [69].

У дійсності вимога, яка полягає в тому, що функція смуги пропускання спектрального прикладу апроксимується трикутником, не завжди виконується. У. Охо розвинув метод на випадок довільної функції смуги пропускання [69].

Якщо спектрометр має функцію смуги пропускання  $s(\lambda, \lambda_0)$  і вимірює випромінювання зі спектральним розподілом  $S(\lambda)$ , продемонстровано на рисунку 9.23, вимірне значення  $M_0$  спектрометра на довжині хвилі  $\lambda_0$  дається інтегралом:

$$M_0 = s \int S(\lambda, \lambda_0) S(\lambda) d\lambda. \quad (9.53)$$

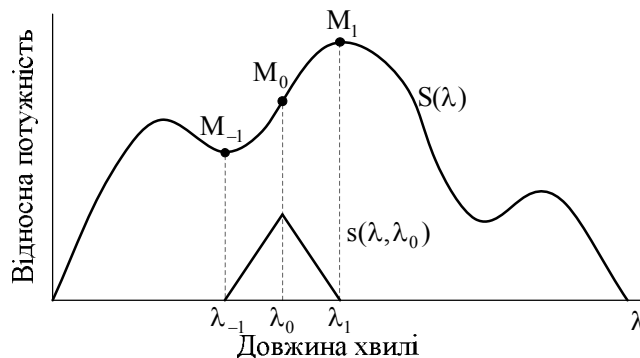


Рисунок 9.23 – Вимірювання за допомогою спектрометра з довільною функцією ширини смуги пропускання

Та сама форма рівняння застосовується й для сусідніх точок при  $\lambda_{-1}$  і  $\lambda_1$ .

Істинні значення випромінювання на сусідніх довжинах хвиль представлені  $S_{-1}, S_0, S_1$ :

$$S_{-1} = S(\lambda_{-1}), \quad S_0 = S(\lambda_0), \quad S_1 = S(\lambda_1). \quad (9.54)$$

Якщо смуга пропускання охоплює інтервал довжин хвиль від  $\lambda_{-1}$  до  $\lambda_1$ , вимірне значення  $M_0$  належить до істинних значень  $S_{-1}, S_0, S_1$  через рівняння 8.53:

$$M_0 = a_{-1}S_{-1} + a_0S_0 + a_1S_1, \quad (9.55)$$

де  $a_{-1}, a_0, a_1$  – вагові коефіцієнти ( $a_{-1} + a_0 + a_1 = 1$ ).

Уважаємо, що  $S(\lambda)$  є плавною функцією, її можна інтерполювати квадратичною, яка проходить через три точки –  $S_{-1}, S_0, S_1$ :

$$S(\lambda) = f(\lambda; S_{-1}, S_0, S_1). \quad (9.56)$$

На рисунку 9.24 подано результати вимірювання спектрометром із довільною функцією смуги пропускання  $s(\lambda, \lambda_0)$ .

Рівняння (9.53) можна переписати так:

$$M_0 = \int s(\lambda, \lambda_0) f(\lambda; S_{-1}, S_0, S_1) d\lambda. \quad (9.57)$$

Три коефіцієнти –  $a_{-1}, a_0, a_1$  – в рівнянні (8.53) можуть бути одержані як коефіцієнти чутливості  $M_0$ .

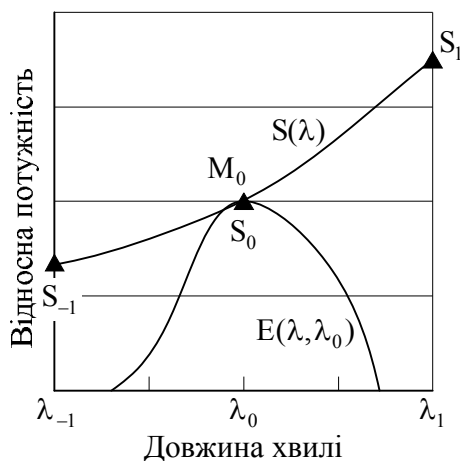


Рисунок 9.24 – Вимірювання спектрометром із довільною функцією ширини смуги пропускання

Значення  $a_{-1}, a_0, a_1$  обчислюються в такий спосіб:

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{[\int s(\lambda, \lambda_0) f(\lambda; S_1 + \Delta S, S_0, S_1) d\lambda - M_0]}{\Delta S}, \\
a_0 &= \frac{[\int s(\lambda, \lambda_0) f(\lambda; S_{-1}, S_0 + \Delta S, S_1) d\lambda - M_0]}{\Delta S}, \\
a_{-1} &= \frac{[\int s(\lambda, \lambda_0) f(\lambda; S_{-1}, S_0, S_1 + \Delta S) d\lambda - M_0]}{\Delta S},
\end{aligned} \tag{9.58}$$

Оскільки ці три коефіцієнти одержані, формуються рівняння для п'яти сусідніх точок –  $M_{-2}$ ,  $M_{-1}$ ,  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ . З наближенням  $S_{-3} = M_{-3}$  і  $S_3 = M_3$  значення  $S_0$  (скориговане до нульової смуги пропускання) одержується за формулою:

$$\begin{aligned}
S_0 &= b_{-2} \cdot M_{-2} + b_{-1} \cdot M_{-1} + b_0 \cdot M_0 + b_1 \cdot M_1 + b_2 \cdot M_2, \tag{9.59} \\
b_{-2} &= \frac{a_{-1}^2}{\lambda}, \quad b_{-1} = \frac{a_{-1}}{\lambda}, \quad b_0 = \frac{a_0}{\lambda}, \quad b_1 = -\frac{a_1}{\lambda}, \quad b_2 = \frac{a_1^2}{\lambda}, \quad \text{і } \lambda = a_0 - 2a_{-1}a_1.
\end{aligned}$$

Розв'язок може бути одержаний для будь-якої функції смуги пропускання, нелінійної, асиметричної в припущенні, де  $S(\lambda)$  є плавною функцією.

#### 9.16.17 Інші складники в невизначеностях

Існує багато складників у невизначеностях у результатах спектральних вимірювань параметрів джерел світла, не пов'язаних зі смугами пропускання та інтервалами вимірювань, а саме: похибка в значенні довжини хвилі, шуми, стороннє світло, люмінесценція, нелінійність фотоприймача, невизначеності, пов'язані з еталоном, тощо. Шуми (в діапазоні функціонування) та стороннє світло є особливо критичними для вимірювань параметрів СД, оскільки типові СД мають випромінювання лише в частині видимого діапазону. Якщо стороннє світло виникає в області спектра, де СД не випромінює, ефект спотворення кольору буде суттєвим. Деякі прилади не пропускають сигналів із від'ємними значеннями (наприклад шумів), що є недопустимим у спектральних розподілах, за якими вимірюються колірні параметри СД. Якщо від'ємні шумові сигнали знижуються до нуля, решта додатних (особливо в області, де СД не випромінює) спричинюють такий самий ефект, як і стороннє світло, що може призводити до істотних похибок у вимірюваннях колірних параметрів. У разі ДУФВ невизначеності вимірювань стають ще чутливішими через люмінесценцію.

Невизначеності в спектральних параметрах або похибки в значеннях довжин хвиль мають підсумовуватися в невизначеностях колірних параметрів (координат колірності, корельованої колірної температури, домінантної довжини хвилі) за допомогою статистичних методів.

### 9.17 Інші складники невизначеностей

Є багато інших, крім спектральної ширини смуги й інтервалу сканування складників невизначеностей у спектральних вимірюваннях джерел світла, таких як похибка довжини хвилі, шум, розсіяне світло, флуоресценція, лінійність приймача, невизначеності спектральних еталонів тощо. Шум (динамічний діапазон) і розсіяне світло є особливо важливими для вимірювань СД, оскільки типові СД випромінюють тільки в частині видимої області. Якщо сигнал від розсіяного світла потрапляє на області, де у СД відсутнє випромінювання, вплив на колір буде значним. Невизначеності в спектральних значеннях або в невизначеностях довжини хвилі будуть розповсюджуватись невизначеності в кольорових величинах (такі як координати кольоровості, корельовано кольорова температура, домінантна довжина хвилі) статистичними методами.

## 10 МЕТРОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ ТА ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ЇХ ОСНОВІ

Знання повного комплексу параметрів і характеристик світлодіодного освітлювального пристрою дає змогу прогнозувати його поведінку на тривалий час, оптимізувати конструкції, покращувати теплові характеристики, підвищувати енергетичну ефективність і забезпечувати виробництво конкурентоспроможних світлотехнічних виробів. Водночас метрологічна база вимагає наявності сучасних високоточних вимірювальних приладів, атестованих відповідно до міжнародних вимог. Складниками метрології світлодіодного освітлювального пристрою є метрологія самого світлодіода як основного елементу системи освітлення та метрологія освітлювальної системи загалом. Для визначення відповідності параметрів і характеристик світлодіодів, що заявляються виробником, із реальними необхідні такі види метрологічного контролю:

- вимірювання спектральних характеристик та визначення корельовано колірної температури, індексу передачі кольору, координат кольоровості;
- вимірювання вольт-амперних характеристик і визначення електричної потужності світлодіода при заданому номінальному (робочому) струмі;
- вимірювання світлового потоку світлодіода при заданому струмі й визначення його енергетичної ефективності (світловіддачі);
- вимірювання залежності світлового потоку світлодіода від температури в діапазоні температур, що регламентуються виготовлювачем;
- вимір залежності спектрального складу випромінювання, корельовано колірної температури та індексу передачі кольорів від температури;
- вимірювання розподілу температури на світловипромінювальних кристалах, контактних ділянках, теплопровідних шарах при тривалій роботі світлодіода й нормальних умовах його охолодження та визначення теплових опорів.

Усі перелічені вимірювання проводяться з використанням комплексів на основі спектрометра, фотометричної сфери малого діаметра, системи вимірювання електричних параметрів, камери тепла й холоду з вбудованим у неї тепловізором і можливістю підключення спектрометра за допомогою оптичного кабелю.

На рисунку 10.1 наведені фотографії сучасних гоніофотометрів для вимірювання характеристик світлодіодів. Вимірювання проводяться у рекомендованих МКО геометрія *A* чи *B*. Можливості приладу дають змогу забезпечувати:



- вимірювання сили світла в діапазоні від 10 мкд до 200 кд;
- вимірювання кривої сили світла при обертанні світлодіода навколо у-вісі (автоматично) в діапазоні кутів від 10° до 90° та навколо С-вісі (вручну) в діапазоні 0-360°;
- вимірювання вольт-амперних характеристик при живленні світлодіода від стабілізованого джерела струму від 1 мА до 2 А та діапазоні керувальних напруг від 0,001 В до 15 В;
- точність встановлення електричних параметрів  $\pm 0,2\%$ .

Гоніофотометр дає змогу визначити практично всі параметри і характеристики світлодіодів для прийняття рішення про можливість їх використання при виробництві освітлювальних приладів.



Рисунок 10.1 – Фотографія сучасних гоніофотометрів для світлодіодів

Один із сучасних приладів для вимірювання теплових опорів, температури світловипромінювального кристала світлодіода, електричних характеристик світлодіодів поданих на рисунку 10.2. Типовою особливістю таких приладів є повна автоматизація процесу вимірювань у широкому діапазоні струмів (від 0,1 мА до 2А) та напруги (від 0 В до 15 В) світлодіодів.



Рисунок 10.2 – Система вимірювання теплових та електричних параметрів світлодіодів

Вимірювання проводяться в повністю автоматизованому режимі в разі забезпечення таких параметрів:

- діапазон вимірювання прямого струму від 0,1 мА до 20 мА/100 мА/500 мА/2 А, (автоматичне перемикання діапазону);
- точність вимірювання прямого струму  $\pm 0,1\%$ ;
- діапазон вимірювань прямої напруги від 0,000 В до 15,000 В;
- точність вимірювання прямої напруги  $\pm 0,05\%$ ;
- діапазон вимірювання зворотної напруги від 0,000 В до 15,000 В;
- діапазон змін температур термостолика від 5 °С до 90 °С;
- стабільність температури:  $\pm 0,2$  °С.

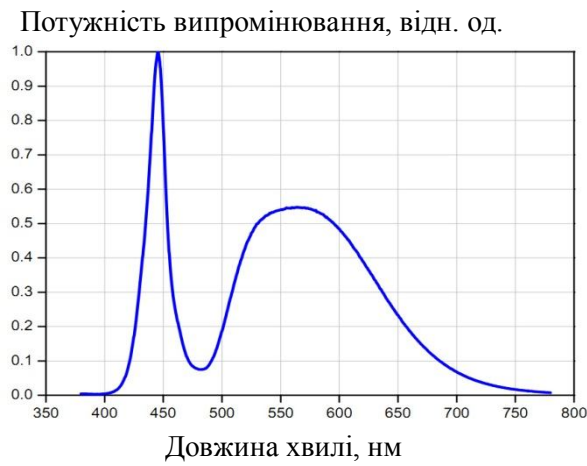
Для визначення повного світлового потоку світлодіода особливо для білого потужного світлодіода), його спектральної характеристики, колірних координат, індексу кольоропередачі, корельовано колірної температури та інших параметрів використовуються фотометричні шари невеликого діаметру (до 0,5 м) та спектро радіометри (рис. 10.3). Показаний на рисунку спектро радіометр не потребує підключення до комп'ютера, а в змозі

відображати всю інформацію на власному екрані. Для демонстрації можливостей сучасного метрологічного обладнання для вимірювань параметрів і характеристик світлодіодів для освітлювальної техніки на рисунку 10.4 наведені приклади типових спектральних та кутових характеристик потужного білого світлодіода, отриманих



Рисунок 10.3 – Спектро радіометр з інтегрувальною сферою малого діаметру для вимірювання потужних світлодіодів

із використанням спектро радіометра з інтегрувальною сферою (рис. 10.3) та гоніофотометра (рис. 10.1). Рисунок 10.5 демонструє вольт-амперну характеристику білого потужного світлодіода, отриману за допомогою системи вимірювання теплових та електричних параметрів світло діодів (рис. 10.2) та залежність його світлового потоку від прямого струму, отриману за допомогою інтегрувальної сфери та спектро радіометра (рис. 10.3). Температурні залежності світлового потоку та зміни прямої напруги для потужного білого світлодіода, подані на рисунку 10.6, отримані за допомогою системи вимірювання теплових та електричних параметрів світлодіодів (рис. 10.2).

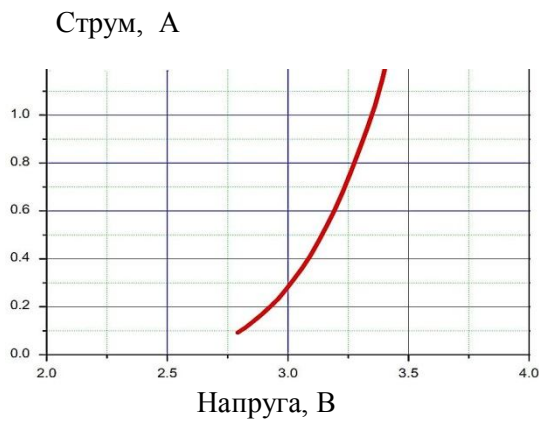


а



б

Рисунок 10.4 – Типові спектральна (а) та кутова (б) характеристики потужного білого світлодіода

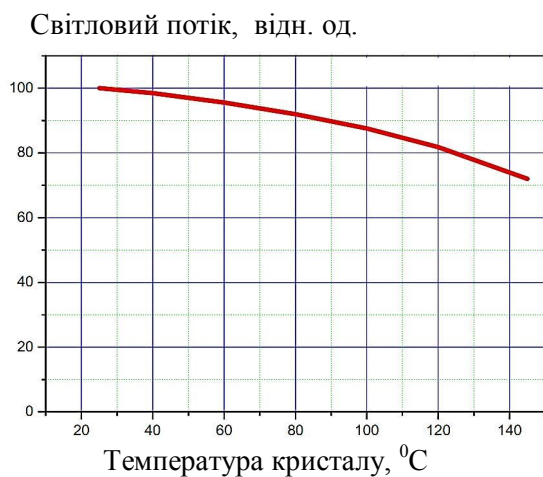


а

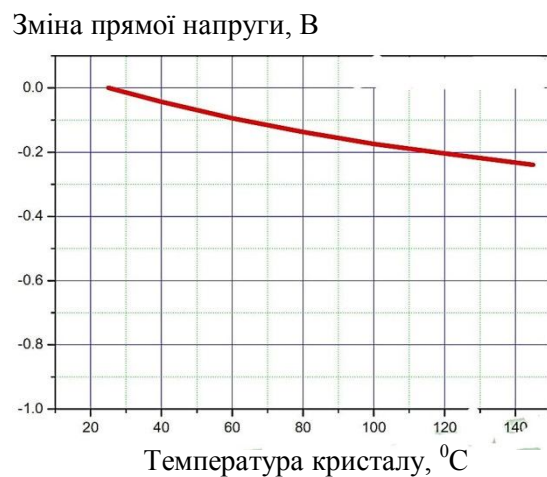


б

Рисунок 10.5 – Вольт-амперна характеристика білого потужного світлодіода (а) та залежність його світлового потоку від прямого струму (б)



а



б

Рисунок 10.6 – Температурні залежності світлового потоку (а) та зміни прямої напруги (б) для потужного білого світлодіода

## 10.1 Метрологія світлодіодних освітлювальних приладів

Усі описані вище колориметричні та фотометричні методи вимірювання лежать в основі роботи сучасного метрологічного обладнання для характеристики не тільки світлодіодів, але й освітлювальних приладів на їхній основі. Таке обладнання відрізняється від обладнання для вимірювання малогабаритних світлодіодів можливістю комплексного вимірювання світлодіодних освітлювальних приладів великих розмірів (наприклад зі світловипромінювальною поверхнею розміром до  $2 \text{ м}^2 \times 2 \text{ м}^2$ ). До такого обладнання належать спектрофотометри-радіометри, гоніофотометри, фотометричні кулі. До додаткового обладнання, необхідного для проведення комплексних вимірювань характеристик світлотехнічних приладів також належать тепловізійні системи контролю температури кристала й арматури, що оточує світлодіод у процесі його роботи, системи вимірювання коефіцієнту пульсацій світлового потоку освітлювального приладу, а також прилади, що безпосередньо вимірюють параметри електронних систем керування світлотехнічними пристроями – напругу живлення, струм, споживану потужність, коефіцієнт корисної дії, фактор потужності, або коефіцієнт струмових гармонік, рівень електромагнітних завад тощо.

Наведемо основні параметри й характеристики сучасного світлодіодного освітлювального пристрою, які потребують вимірювань:

- потужність, напруга живлення, фактор потужності;
- коефіцієнт струмових гармонік (до 50-ї гармоніки);
- спектральна характеристика випромінювання, корельовано колірною температурою, індекс передачі кольору, параметри кольоровості;
- просторовий розподіл світлового потоку (далі – КСС), повний світловий потік;
- енергетична ефективність (світловіддача) пристрою;
- динаміка зміни світлового потоку за тривалий час з моменту включення, фіксація часу виходу світлового потоку на насичення й величини спаду світлового потоку;
- динаміка зміни колірної температури в часі;
- параметри, пов'язані з вимогами стандартів на ті чи інші освітлювальні прилади (напруги електричного пробую, параметри, пов'язані з ударною міцністю, кліматичними діями, герметичністю тощо).

Забезпечення цих вимірів вимагає спеціального метрологічного обладнання, що забезпечує високу точність вимірювання, автоматизацію процесу вимірювання та аналітичну обробку результатів вимірювань із виводом необхідної інформації на друк (комп'ютеризовані гоніофотометри,

фотометричні сфери великого діаметра, спектрорадіометри, камери тепла й холоду, тепловізійні установки тощо)

## 10.2 Спектрорадіометри

Сучасні спектрофотометри-радіометри, що працюють із фотометричними кулями різного діаметру (від 0,3 м до 2 м залежно від розміру об'єкта, що вимірюється) становлять автоматизовані комп'ютеризовані пристрої, які за достатньо короткий час дозволяють проводити вимірювання залежності потужності випромінювання від довжини хвилі з кроком 0,1–0,5 нм і на основі цих залежностей розраховувати й будувати спектральні характеристики світловипромінюючого пристрою, приведені до спектральної характеристики чутливості ока, розраховувати корельовано колірну температуру, інтегральну потужність випромінювання, індекс кольоропередачі, точність встановлення колірних координат відповідно до еліпсів Мак Адама тощо.

Складниками спектрорадіометричних комплексів є фотометричні сфери різного діаметра (рис. 10.7), спектрорадіометри (рис. 10.8) та інше обладнання, що забезпечує живлення світлотехнічного приладу (високоточні джерела напруги або струму), персональні комп'ютери для реалізації керування процесами вимірювання та обробки результатів вимірювання. Можливе використання додаткових пристроїв – камер тепла й холоду для проведення вимірювань деяких спектральних характеристик у широкому температурному діапазоні.

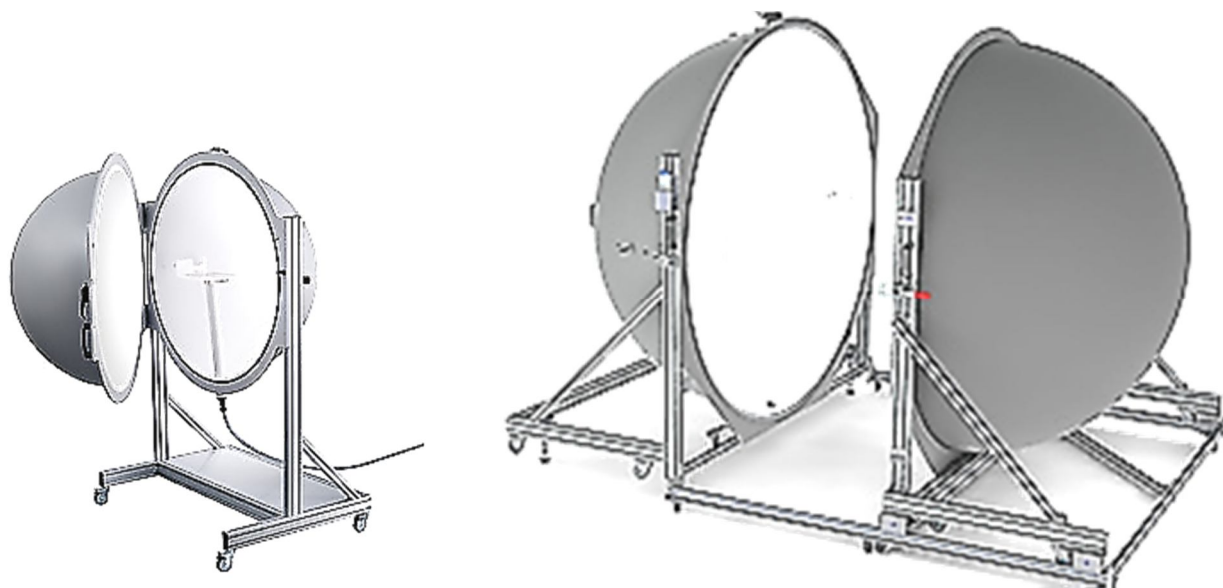


Рисунок 10.7 – Фотометричні сфери діаметром 1 м та 2 м





Рисунок 10.8 – Спектрорадіометр

У таблиці 10.1 наведені типові параметри таких спектрорадіометрів для різних діапазонів спектру (видимого В, інфрачервоного ІЧ різних діапазонів, ультрафіолетового УФ).

Таблиця 10.1 – Типові параметри спектрорадіометрів

	УФ	В	УФ-В	В-ІЧ	УФ-ІЧ	ІЧ1	ІЧ2
Спектральний діапазон	200–400 нм	380–780 нм	200–800 нм	350–1 100 нм	200–1 200 нм	780–1 650 нм	1 500–2 550 нм
Спектральна роздільна здатність	1 нм	2,0 нм	4 нм	4 нм	5 нм	9 нм	15 нм
Точність встановлення довжини хвилі	±0,1 нм	±0,3 нм	±0,3 нм	±0,3 нм	±0,3 нм	±0,5 нм	±3 нм

Типовий спектрорадіометричний комплекс наведено на рисунку 10.9.



Рисунок 10.9 – Типовий спектрорадіометричний комплекс

Наведемо декілька прикладів вимірювання оптичних параметрів світлодіодного джерела світла (для прикладу взято світлодіодну лампу з цоколем E27 потужністю 8,5 Вт).

На рисунку 10.10 зображена фотографія лампи (а) та її спектральна характеристика випромінювання (б). У таблиці 10.2 наведені розраховані на основі спектральної залежності потужності випромінювання від довжини хвилі такі параметри, як інтегральна потужність випромінювання, колірні координати, корельована колірна температура, світловий потік, доміантна довжина хвилі. Точка на колірному трикутнику (рис. 10.10, в) відповідає колірним координатам вимірюваного джерела світла й наочно демонструє наскільки колірні параметри відхиляються від координат чистого білого світла (крива Планка на колірному трикутнику) з різною колірною температурою. Особливо інформативно представляється положення точки на еліпса Мак Адама, яка характеризує відхилення кольору в нашому випадку від чистого білого (рис. 10.10, г). Важливою характеристикою практично всіх світлодіодних джерел світла є залежність світлового потоку та колірної температури від часу з моменту включення джерела світла. Ця характеристика демонструє якість системи відводу тепла від світло випромінювального кристала світлодіода. Крім того, падіння світлового потоку на 3–5 % від початкового за 30–40 хвилин із моменту вмикання джерела світла й подальша стабілізація світлового потоку та колірної температури, характеризують ефективну систему тепловідводу освітлювального приладу і, як наслідок, відсутність суттєвої деградації оптичних параметрів за достатньо великий термін роботи приладу (десятки тисяч годин).

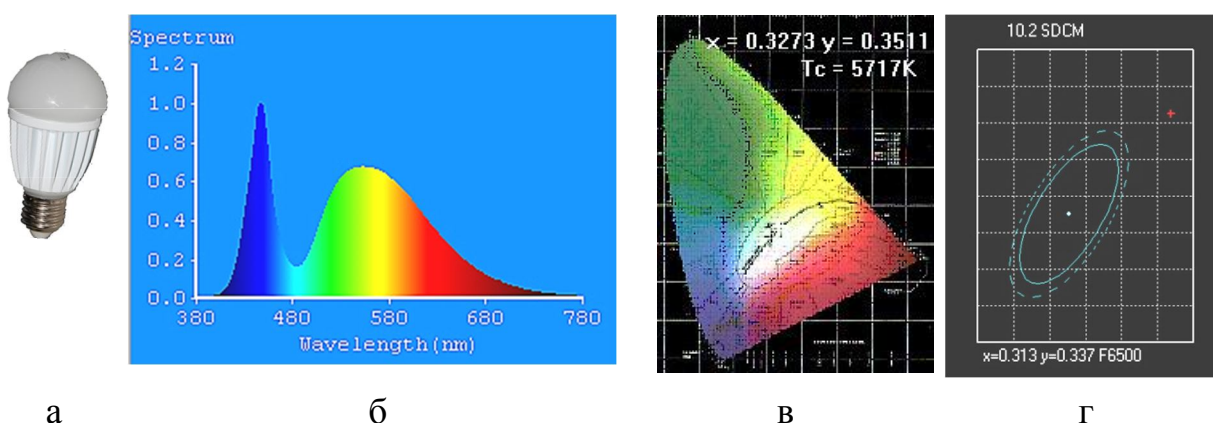


Рисунок 10.10 – Фотографія світлодіодної лампи (а), її спектральна характеристика (б), колірний трикутник (в) та еліпс Мак Адама (г)

Спектрорадіометричний комплекс, наведено на рисунку 10.9, дає змогу в автоматичному режимі отримувати ці важливі характеристики й будувати



залежності світлодіодного потоку та корельованої колірної температури від часу. При цьому вимірювання протягом 1–2-х годин може проводитись з інтервалом між вимірюваннями від 0,5 с до 1 хв. На рисунку 10.11 наведені дві криві, що характеризують якісну (а) і неякісну (б) систему відводу тепла в світлодіодній лампі потужністю 6 Вт (рис. 10.11 а) та 8,5 Вт (рис. 10.11 б) . Зміна корельовано колірної температури з часом теж характеризують якість системи охолодження світлодіодів.

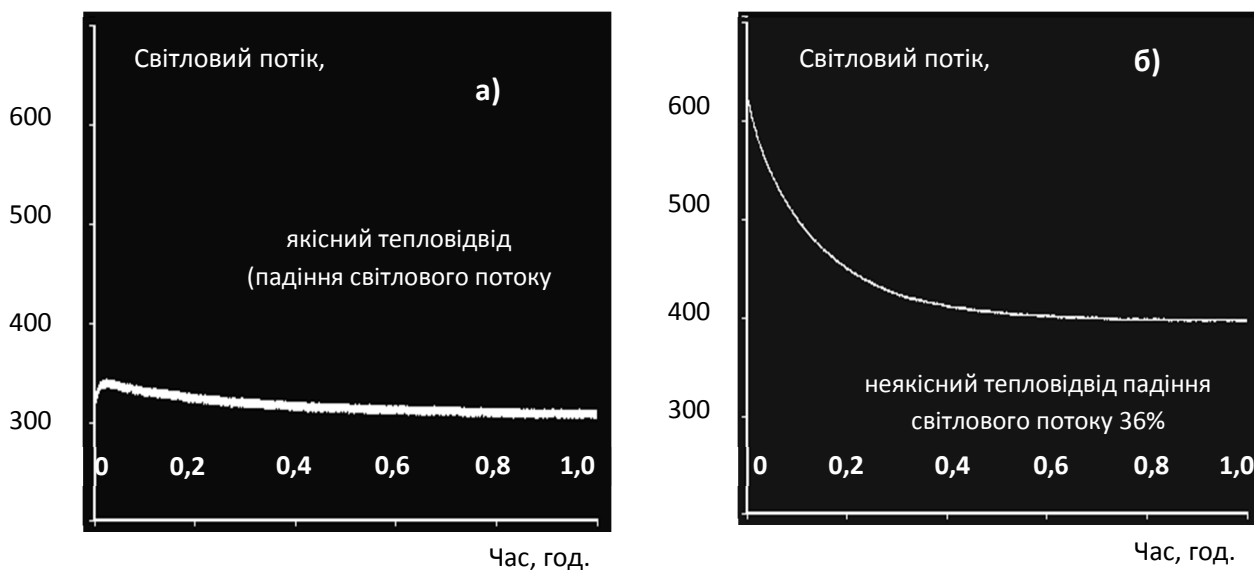


Рисунок 10.11 – Часові характеристики зміни світлового потоку для якісної системи відводу тепла від світлодіодів (а, лампа потужністю 6Вт) та неякісної (б, лампа потужністю 8,5 Вт)

Таблиця 10.2 – Розраховані параметри

Світловий потік, лм	Потужність випромінювання, мВт	Колірні координати (x,y; u',v')	Кольорова температура, К	Домінуюча довжина хвилі, нм
546,0	1 668	0,328 4, 0,349 4; 0,201 0, 0,481 1	5 671	535,7
473,7	1 452	0,327 3, 0,351 1; 0,199 6, 0,481 8	5 717	533,0

### 10.3 Гоніофотометри

Гоніофотометрами називаються фотометри для вимірювання кутових характеристик розподілу сили світла, світлового потоку, просторового розподілу кольорів (при використанні як фото приймального пристрою спектрофотометра) світлодіодних освітлювальних приладів. На рисунку 10.12

показані типові криві світла світлодіодного вуличного світильника для магістральних доріг та магістральних вулиць загальноміського значення (а) та світлодіодного стельового світильника типу «Амстронг» (б).

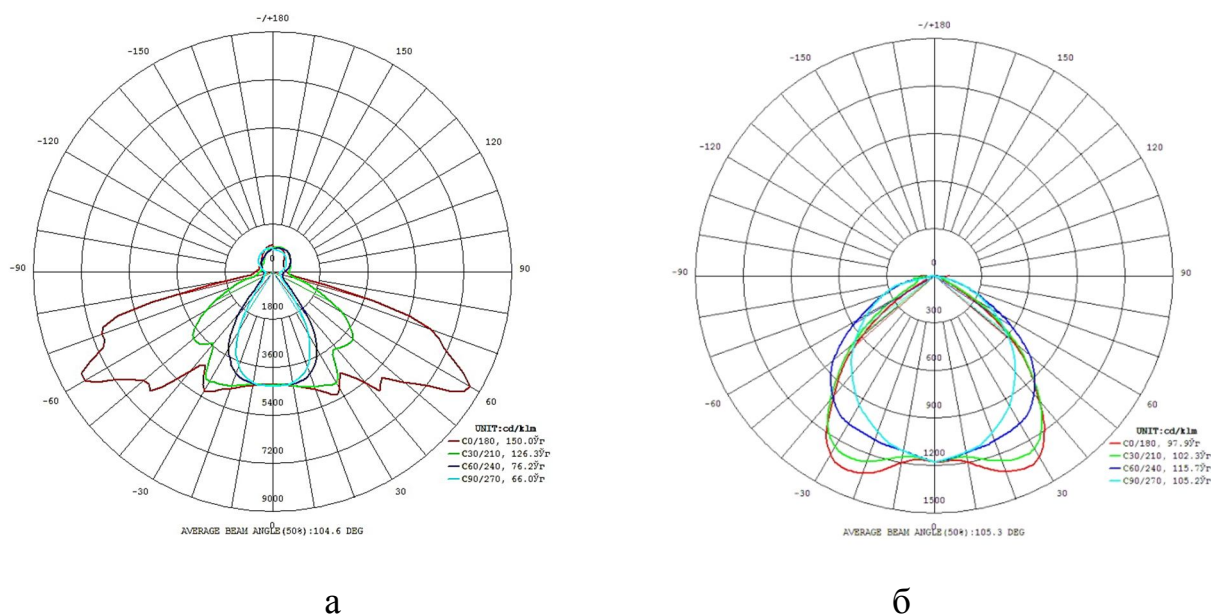


Рисунок 10.12 – Типові криві світла для світлодіодного вуличного світильника (а) для магістральних доріг та магістральних вулиць загальноміського значення (категорія міського простору А) та світлодіодного стельового світильника типу «Амстронг» (б)

У поданих на рисунку гоніофотометрах зазвичай джерело світла обертається у двох ортогональних площинах в діапазоні кутів  $\pm 180^\circ$ , а фотометрична головка встановлюється у фіксованому положенні. При цьому можлива реалізація обох конфігурацій СІЕ –  $C-\gamma$  та  $B-\beta$ . Точність встановлення кутів становить  $0,05^\circ$ , а діапазон освітленостей, що вимірюються, становить від 0,000 1 лк до 200 000 лк при коефіцієнті лінійності фотометричної головки 0,2 %.

На рисунку 10.13 наведені чисельні конструкції таких приладів, що дозволяють проводити вимірювання зразків світлотехнічних приладів із розмірами до  $2 \times 2 \text{ м}^2$  в геометрії вимірювання СІЕ  $B-\beta$  або СІЕ  $C-\gamma$  відповідно до міжнародних стандартів. Практично всі гоніофотометри встановлюються в спеціально обладнаних «чорних» кімнатах для забезпечення високої точності вимірювань.



Рисунок 10.13 – Конструкції сучасних гоніофотометрів для вимірювання зразків світлотехнічних приладів із розмірами до  $2 \text{ м}^2 \times 2 \text{ м}^2$  у геометрії вимірювання СІЕ В- $\beta$  або СІЕ С- $\gamma$  відповідно до міжнародних стандартів

#### 10.4 Засоби вимірювання електричних параметрів світлодіодних освітлювальних систем

Безумовно однією з найважливіших характеристик світлодіода, або світлодіодного освітлювального приладу, є енергетична ефективність (світловіддача, лм/Вт). Для визначення світловіддачі, наприклад світлодіодної лампи, достатньо за допомогою фотометричної кулі, спектро радіометра й високоточних джерел живлення визначити електричну потужність споживання приладу та повний світловий потік, що ним випромінюється. Для визначення світловіддачі освітлювального приладу великих розмірів неможливо використання фотометричної кулі. У цьому випадку ефективним засобом вимірювання світлового потоку стають гоніофотометри.

Сучасні білі світлодіоди, які виробляються відомими світовими компаніями (CREE, Nichia, Osram, Philips, Seoul Semiconductor і інші) досягли значень світловіддачі від 100 лм/Вт до 150 лм/Вт. Світловіддача конкретних світлотехнічних пристроїв, що використовують ці світлодіоди (вуличні світильники, світильники для об'єктів житлово-комунального господарства та бюджетної сфери, промисловості, транспорту тощо), зменшується стосовно світловіддачі світлодіодів на 20–50 %. Пов'язано це з втратами світлового потоку на арматурі світильника (на лінзах, на світлорозсіювачах, на конструктивних елементах тощо), а також із втратами потужності на електронних системах керування пристроями (коефіцієнт корисної дії джерела живлення світлотехнічного приладу ККД < 100 %) та впливом фактора потужності (або  $\cos\phi < 1$ ). Усі перелічені параметри, які визначають втрати світлового потоку та впливають на кінцеве значення енергетичної ефективності світлотехнічного приладу, потребують засобів вимірювання.

Для встановлення точних значень вхідної напруги живлення (постійний за необхідності, або змінний струм) використовуються високоточні джерела живлення, які спроможні з високою точністю підтримувати частоту, форму, напругу синусоїдальної форми для живлення світлодіодного джерела світла, або у випадку живлення від постійного струму точно підтримувати значення постійної напруги або струму. На рисунку 10.14 наведено такі універсальні джерела живлення – для змінного струму (а) та для постійного струму (б).



Рисунок 10.14 – Джерела змінного струму (а) та постійного струму (б) для живлення світлодіодних освітлювальних приладів при їх тестуванні

До засобів вимірювання електричних величин належать такі прилади, як вимірювачі напруги, струму, потужності, коефіцієнту струмових гармонік. Сучасні універсальні прилади дозволяють вимірювати перелічені параметри одночасно.

На рисунку 10.15 подано такий універсальний вимірювальний прилад, який крім безпосереднього вимірювання напруги, струму, потужності, фактору потужності може реалізовувати аналіз розподілу струмових гармонік та виводити для друку й на екран комп'ютера відповідні спектрограми та обчислювати інтегральний коефіцієнт струмових гармонік відповідно до міжнародного стандарту IEC61000-3-2.



Рисунок 10.15 – Універсальний прилад вимірювання напруги, струму, потужності, фактору потужності, спектру струмових гармонік

На рисунку 10.16 наведено два приклади форм напруги, струму та спектрального розподілу струмових гармонік для блока живлення, що відповідає вимогам сучасних стандартів (а) і не відповідає (б) – інтегральний коефіцієнт струмових гармонік перевищує допустимий.

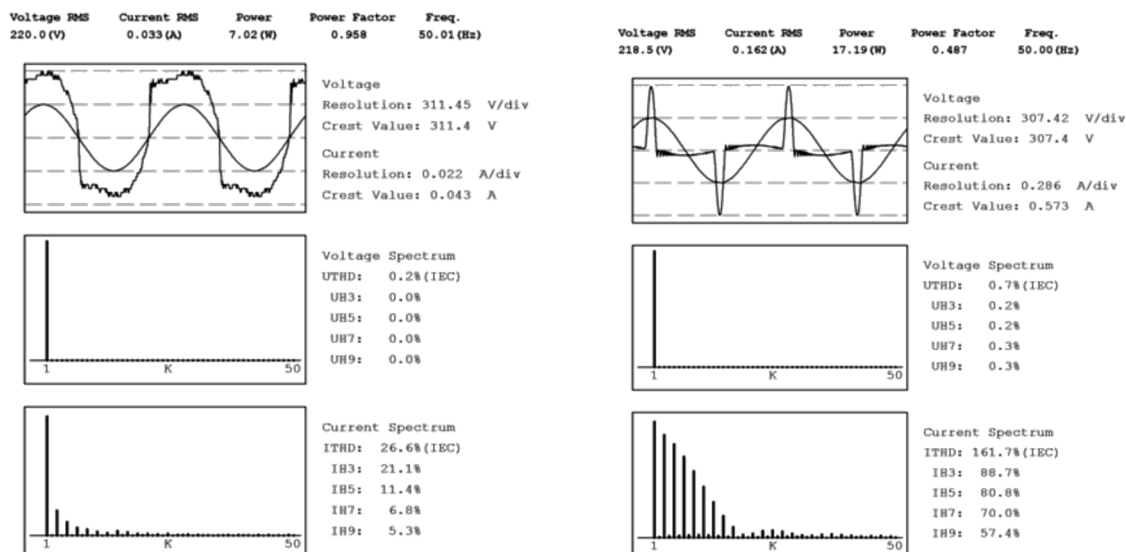


Рисунок 10.16 – Приклади форм напруги, струму і спектрального розподілу струмових гармонік для різних блоків живлення світлодіодним освітлювальним приладом

## 10.5 Тепловізійні засоби вимірювання

Конструкції сучасних світлодіодних освітлювальних приладів передбачає наявність систем відводу тепла від потужних світловипромінювальних кристалів для стабілізації температурних режимів роботи світлодіодів в оптимальному діапазоні температур, регламентованому виробником.

Правильний вибір матеріалу, форми та теплорозсіюючої площі радіаторів сприяє різкому підвищенню терміну роботи освітлювального приладу загалом.

Метод вимірювання температури різних ділянок світлотехнічного приладу на основі термопар потребує використання багатоканальних систем вимірювання (до 10 термопар підключаються одночасно) і не завжди дозволяє розміщувати термопари в ділянки світлотехнічного пристрою, температурний режим роботи яких викликає найбільший інтерес.

Використання методу інфрачервоної тепловізійної мікроскопії дає змогу проводити безпосередні виміри розподілу температури не тільки по поверхні радіатора, деталей електронної плати керування, плати з розташованими світлодіодами, але й розподіл температури по площі світловипромінювального *p-n*-переходу світлодіодного кристала.

Останній фактор дуже важливий, бо в потужних світлодіодах при високих рівнях збудження (великих струмах) можуть виникати значні температурні градієнти, обумовлені неоднорідністю розподілу струму по площі активної області світлодіода.

Такий ефект потрібно враховувати як при конструюванні світловипромінювального приладу, так і при оцінці допустимих режимів керування ним.

Використання сучасних теплових зорів зі змінними інфрачервоними об'єктивами та спеціальним програмним забезпеченням дає змогу ефективно вимірювати розподіл температури в різних зонах освітлювального приладу з достатньою роздільною здатністю, а також відслідковувати в автоматичному режимі динаміку зміни температури в характерних точках приладу за великий проміжок часу (до 2–3 годин) з інтервалом між вимірюваннями від 1 с до 15 хвилин.

На рисунку 10.17 наведено варіант системи визначення динаміки зміни температури на робочих поверхнях світлодіодного освітлювального пристрою (світлодіодної лампи з цоколем E27), побудованої на основі тепловізора FLIR





Рисунок 10.17 – Система вимірювання теплових параметрів світлодіодів на основі тепловізора

На рисунку 10.18 подано розподіл теплових полів для різних поверхонь світлодіодних ламп потужністю 8 Вт із різними робочими площами радіаторів ( $180 \text{ см}^2$  – великий радіатор,  $128 \text{ см}^2$  – малий радіатор).

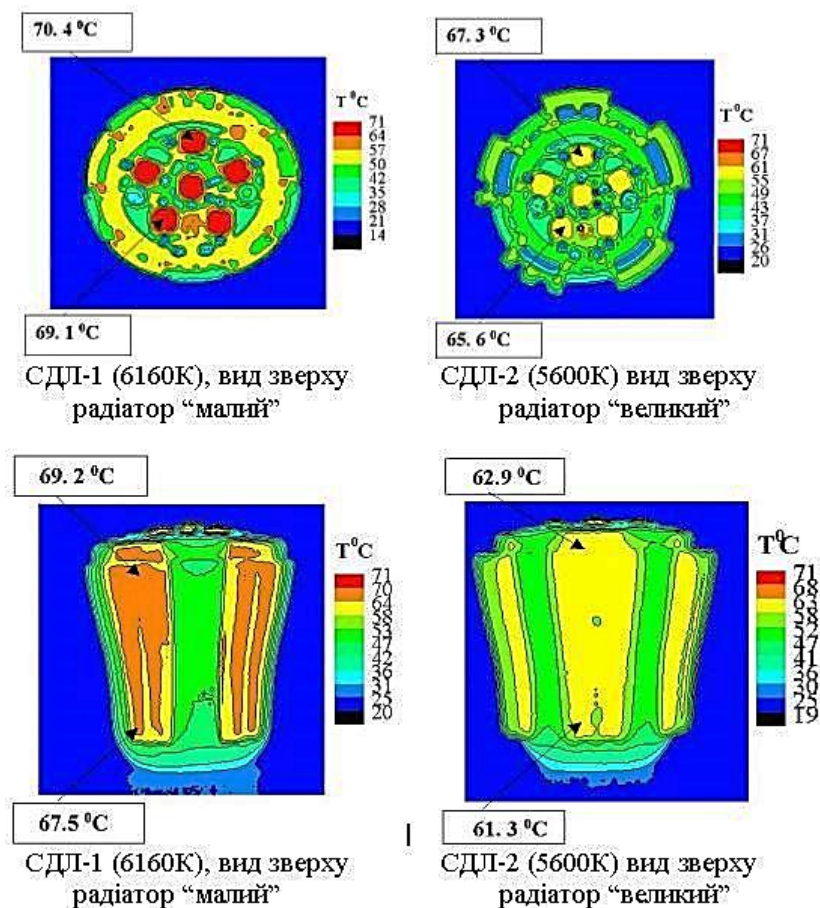


Рисунок 10.18 – Розподіл теплових полів по різних поверхнях світлодіодної лампи (СДЛ). Угорі – вид із боку світлодіодної плати, внизу – вид із боку радіатора. На термограмах зазначені максимальні й мінімальні температури в градусах Цельсія, а також температурна шкала



Для прикладу на рисунку 10.19 продемонстровані термограми світлодіодної плати вуличного світлодіодного світильника в момент вмикання (а) і через 40 хвилин після безперервної роботи світильника (в), а також графік зміни температури у вибраній зоні світильника (максимально гаряча область) від часу (б).

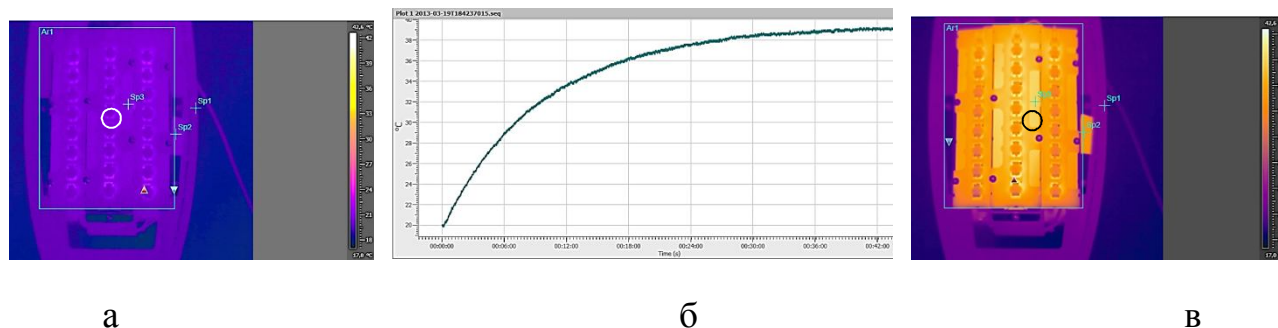


Рисунок 10.19 – Термограми світлодіодної плати вуличного світлодіодного світильника в момент вмикання (а) і через 40 хвилин після вмикання (в), а також графік зміни температури у вибраній зоні світильника (максимально гаряча область) від часу (б)

## 10.6 Засоби температурних випробувань

Кліматичні умови експлуатації світлотехнічного приладу є важливими вимогами, які гарантують працездатність приладу при заданих діапазонах тиску, вологості, температури. Особливе значення набуває останній параметр, оскільки підвищені температури експлуатації світлодіодного освітлювального приладу (400–600 °С), який сам більше 50 % споживаної потужності перетворює в тепло, вимагають додаткових заходів щодо температуростійкості при проектуванні та виробництві освітлювальних приладів. Проведення вимірювань оптичних та електричних параметрів світлодіодного джерела світла в спеціальних камерах тепла й холоду дають змогу встановити діапазони температур, у яких зберігається працездатність освітлювального приладу та забезпечуються параметри, регламентовані виробником.

На рисунку 10.20 наведено експериментальний комплекс для проведення температурних досліджень світлотехнічних приладів.

Експериментальний комплекс для проведення температурних досліджень фотометричних і електричних параметрів та контролю температури складників у характерних точках світлодіодних ламп містить:

- 1) термокамеру Binder MK53 із функцією нагрівання – охолодження;
- 2) додаткові порти доступу з силіконовими заглушками з лівого та правого боків камери для введення зовнішніх вимірювальних пристроїв;

- 3) додатковий датчик температури PT100;
- 4) набір із кабелю та конвертера RS422/USB для підключення комплексу до ПК;
- 5) високоточні джерела живлення постійної та змінної напруги;
- 6) багатоканальну систему термопар YF500;
- 7) спектрорадіометр HAAS 2000;
- 8) програмне забезпечення для керування роботою комплексу за допомогою ПК.



Рисунок 10.20 – Експериментальний комплекс для проведення температурних досліджень світлотехнічних приладів

Комплекс забезпечує такі технічні характеристики:

- функція нагрів – охолодження в діапазоні температур від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- просторова температурна неоднорідність:  $0,4 - 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- температурна неоднорідність часова:  $\pm 0,1 \dots 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- велике вікно для спостереження ( $280\text{ мм} \times 280\text{ мм}$ ), внутрішнє підсвічування;
- захист тестових матеріалів від конденсату;

- герметично ізольована рефрижераторна система з повітряним охолодженням;
- інтерфейс RS 422;
- програмований контролер (25 програм по 100 секцій, пам'ять до 500 сегментів програм);
- два вводи з силіконовими заглушками для підключення зовнішніх вимірювальних пристроїв діаметром 50 мм;
- додатковий температурний датчик РТ100, який гнучко монтується з зовнішнім підключенням;
- набір із кабелю й конвертера RS422/USB для підключення комплексу до ПК.

## ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Контакт  $p$ - і  $n$ -напівпровідників у термінах зонної теорії та енергетичних бар'єрів.
2. Проблеми виведення випромінювання з напівпровідникових кристалів.
3. Випрямлення змінних струмів за допомогою  $p$ - $n$ -переходу.
4. Напівпровідниковий випрямний діод.
5. Робота напівпровідникового діода в однонапівперіодному випрямлячі та в мостовій схемі.
6. Як відбувається заповнення електронних оболонок в ізолюваному атомі?
7. Чи можуть всі електрони в атомі зайняти найнижчий енергетичний рівень?
8. Назвіть енергетичні зони в твердому тілі й дайте їм характеристику.
9. Чим відрізняються енергетичні зони у провідниках, діелектриках і напівпровідниках?
10. Поясніть явище електронної емісії.
11. Назвіть види електронної емісії й дайте їм характеристику.
12. Що таке напівпровідники?
13. Чим вони відрізняються від провідників і діелектриків?
14. Назвіть напівпровідникові матеріали.
15. До яких груп таблиці Менделєєва належать ці хімічні елементи?
16. Поясніть явище власної провідності напівпровідників.
17. Які носії заряду існують у напівпровідниках?
18. Поясніть явища генерації та рекомбінації зарядів у напівпровідниках.
19. Охарактеризуйте явище домішкової провідності напівпровідників.
20. Поясніть, як утворюються напівпровідники  $n$ -типу й  $p$ -типу.
21. Поясніть властивості напівпровідників  $n$ -типу й  $p$ -типу.
22. Які носії електричних зарядів у них є основними, а які – неосновними?
23. Що називають електронно-дірковим або  $p$ - $n$ -переходом?
24. Поясніть структуру й основні властивості цього переходу.
25. Що таке пряме та зворотне включення електронно-діркового переходу?
26. Як змінюється потенціальний бар'єр і ширина електронно-діркового переходу залежно від прямого та зворотного включення?
27. Поясніть, що являє собою електричний та тепловий пробіи  $p$ - $n$ -переходу.
28. Опишіть властивості контактного переходу типу «метал – напівпровідник».

29. Поясніть особливості вольт-амперних характеристик  $p$ - $n$ -переходу та контактної пари «метал – напівпровідник» із випрямними властивостями.
30. Класифікація та умовні позначення напівпровідникових діодів
31. Назвіть основні типи напівпровідникових приладів та укажіть кількість  $p$ - $n$ -переходів у них.
32. Наведіть класифікацію та умовні позначення напівпровідникових резисторів.
33. Який параметр найістотніше впливає на опір і вольт-амперні характеристики варисторів, терморезисторів, тензорезисторів і фоторезисторів?
34. Що таке варистор?
35. Накресліть його вольт-амперну характеристику.
36. Що таке коефіцієнт нелінійності варистора?
37. Де використовують варистор?
38. Що таке терморезистор?
39. Накресліть температурні характеристики термістора й позистора.
40. Світловипромінювальні діоди.
41. Альтернативні конструкції світлодіодів.
42. Сонячні елементи.
43. Світлодіоди з кристалами різної геометрії.
44. Температурна залежність джерел білого світла, створених на основі світлодіодів.
45. Застосування напівпровідників із текстурованою поверхнею.
46. Джерела білого світла на основі перетворювачів довжини хвилі.
47. Противідбивальні оптичні покриття.
48. Металеві відбивачі, відбивальні й прозорі контакти.
49. Поняття про планарну технологію виготовлення інтегральних схем.
50. Напівпровідники. Власна провідність напівпровідників.
51. Джерела білого світла на основі світлодіодів.
52. Створення білого світла за допомогою трьох різнокольорових джерел.
53. Власна провідність напівпровідників у термінах зонної теорії.
54. Домішкова провідність напівпровідників.
55. Корпуси для світлодіодів малої та великої потужності.
56. Застосування контактів різної геометричної форми.
57. Нерівноважний стан  $p$ - $n$ -переходу. Пряме та зворотне.
58. Енергетичні рівні ізольованого атома. Принцип Паулі.
59. Напівпровідниковий лазер. Конструкція, принцип дії.
60. Розщеплення енергетичних рівнів і утворення енергетичних зон.
61. Назвіть види електронної емісії й дайте їм характеристику.
62. Принцип роботи СД.

63. Вхідні параметри СД.
64. Вихідні параметри СД.
65. Як одержують біле світло?
66. У яких режимах здійснюється живлення СД?
67. Для чого слугує та як розраховується струмозадавальний резистор?
68. Перелічити основні світлотехнічні характеристики світлодіодів.
69. Яка відстань фотометрирування? Чим вона обумовлена?
70. Пояснити, з чим пов'язане застосування різних схем вимірювання світлодіодів типу А і типу В.
71. Методика зняття КСС.
72. Який порядок розрахунку світлового потоку світлодіодів за їхнім КСС?
73. Спектральний розподіл СД. Пікова довжина хвилі. Ширина спектральної смуги на рівні половини максимуму інтенсивності.
74. Довжина хвилі посередині двох обмежуючих довжин хвиль  $\lambda'_{0,5}$  і  $\lambda''_{0,5}$ . Центроїдна довжина хвилі  $\lambda_c$ .
75. Пояснити графік залежності температури за проміжок часу для світлодіодів з охолодженням та без.
76. Пояснити графік залежності світлового потоку за проміжок часу для світлодіодів з охолодженням та без.
77. Пояснити конструкцію та принцип роботи світлодіодного модуля «Asgiche».
78. Пояснити порядок розрахунку радіатора для СД модуля.
79. Оцініть енергію теплового руху електрона в напівпровіднику при температурі 220 і 100 °С.

## ОБОВ'ЯЗКОВІ ТА ДОДАТКОВІ ЗАДАЧІ Й ПРИКЛАДИ

### Вправи до розділу 4

**Вправа 1.** *Визначення кута виводу випромінення для GaAs, GaN та полімерних світлодіодів.*

Показники заломлення для GaAs, GaN та полімерних матеріалів, що випромінюють світло, дорівнюють 3,4; 2,5 та 1,5. Потрібно розрахувати критичні кути повного внутрішнього відбиття для світлодіодів на основі даних матеріалів та визначити частку світла, яка здатна вийти за межі їхніх планарних структур. Потрібно оцінити зміни, які відбудуться при вміщенні планарного світлодіода із GaAs у герметичний прозорий полімерний корпус з показником заломлення 1,5 ( відбиттям світла на межі розділу полімер – повітря тут можна знехтувати).

**Розв'язок.** Критичні кути повного внутрішнього відбиття  $\phi_c$ : GaAs  $17,1^\circ$ ; GaN  $23,6^\circ$ ; полімер  $41,8^\circ$ . Частка вихідного випромінення: GaAs 2,21 % GaN 4,18 %, полімер 12,7 %. При вміщенні GaAs планарного світлодіода у герметичний прозорий полімерний корпус частка вихідного світла збільшиться на 232 %.

**Вправа 2.** *Визначення ефективності зв'язку світлодіод – оптичне волокно.*

Розглядається планарний світлодіод GaAs із точковою випромінюючою областю, яка розташована безпосередньо поблизу поверхні. Вхідна кутова апертура оптичного волоконного світловода дорівнює  $12^\circ$ . Потрібно визначити частку випромінення з активної області світлодіода, яка попадає в оптичний волоконний світловод. Враховується, що показник заломлення GaAs  $\bar{n}_s = 3,4$ . Втратами на відбиття Френеля на межах розділу напівпровідник-повітря та повітря-оптичне волокно можна знехтувати.

**Розв'язок.** Кутлова апертура напівпровідникового світлодіода, що знайдена за законом Снеліуса, дорівнює  $3,5^\circ$ . Тому частка випромінення з активної області світлодіода, що попадає в оптичне волокно, становить усього 0,093 %.

### Вправи до розділу 6

**Вправа 1.** *Визначити характеристики теплового стоку.*

Розглянемо тепловий стік, необхідний для охолодження світлодіодного модуля XR-E, струм живлення 700 мА. Модуль з'єднаний із тепловим стоком через адгезійну теплову підкладку. Для охолодження використовується вільна конвекція повітря, максимальна температура навколишнього середовища  $T_a = 35^\circ\text{C}$ .

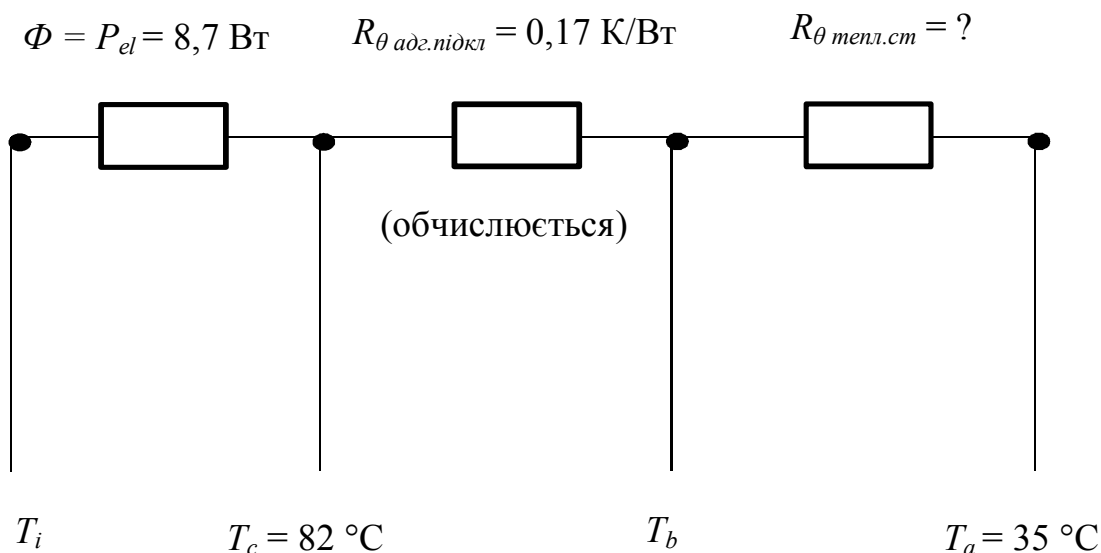


Основні дані:

$$\Phi = P_{el}(\text{max за } 700 \text{ мА}) = 8,7 \text{ Вт (дані специфікації)}.$$

Необхідна температура переходу для терміну служби в 40 000 год.  $T_c = 82 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Еквівалентна схема до розрахунку:



Обчислення:

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{\theta}}, \text{ і отже } R_{\theta} = \frac{\Delta T}{\Phi}.$$

Тепловий опір адгезійної підкладки може бути обчислений за геометричними розмірами (специфікація).

$\lambda = 0,8 \text{ Вт/мК}$ , діаметр  $\varnothing 43 \text{ мм}$ , товщина  $l = 0,2 \text{ мм}$ . І таким чином:

$$n = \frac{N_A \cdot \rho_w \cdot N_e}{\mu_w} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 19,3 \cdot 2}{184} = 1,26 \cdot 10^{23},$$

$$R_{\theta \text{ адг.підкл.}} = \frac{l}{\lambda A} = \frac{4l}{\lambda \pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,0002 \text{ м}}{0,8 \text{ Вт/мК} \cdot \pi (0,043 \text{ м})^2} = 0,17 \text{ К/Вт}.$$

Тоді

$$R_{\theta \text{ адг.підкл.}} = \frac{(T_c - T_a)}{\Phi} - R_{\theta \text{ адг.підкл.}} = \frac{82^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}}{8,7 \text{ Вт}} - 0,17 \frac{\text{К}}{\text{Вт}},$$

$$R_{\theta \text{ адг.підкл.}} = 5,4 \frac{\text{К}}{\text{Вт}} - 0,17 \frac{\text{К}}{\text{Вт}} = 5,23 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}.$$

Якщо потужність становить 8,7 Вт, для забезпечення температури ( $T_c$ ), що не перевищує  $82 \text{ }^\circ\text{C}$  за температури зовнішнього середовища  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , необхідно застосувати тепловий стік з тепловим опором в  $5,23 \text{ К/Вт}$ .

## Вправи до розділу 8

**Вправа 1.** Застосування ламбертівських відбивачів у світлодіодах.

Розглянемо ламбертівський відбивач із коефіцієнтом відбиття, що дорівнює одиниці, який убудовано у структуру світлодіода на основі GaAs, у якого немає ніяких втрат. Показник заломлення GaAs дорівнює 3,5. Уважаємо, що зовнішнім середовищем є повітря. Потрібно розрахувати критичний кут вихідного конуса випромінення та середню кількість відбиттів, які здійснить фотон до того як вилетить за межі матеріалу з високим показником заломлення.

**Розв'язок.**  $\theta_c = 6,16^\circ$ ;  $p = 8,2 \%$ ;  $N = 11,7$ .

**Вправа 2.** Чи можливо знайти застосування гіпотетичному планарному відбивачу, що відбиває проміні, які падають на його поверхню під будь-якими кутами, під прямим кутом? Чи існує фізичний принцип, що не дає реальним відбивачам відбивати проміні у такий спосіб?

**Відповідь.** Для таких відбивачів знайшлося би багато сфер застосування. Але з закону збереження яскравості бачимо, що неможливо створити пасивну оптичну систему, яскравість випромінення якої перевищував би величину  $L/n$ , де  $L$  – яскравість джерела у вакуумі,  $n$ -показник заломлення середовища поширення світла. Тому такі гіпотетичні відбивачі на практиці не можуть бути створені.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Encyclopaedia britannica [Electronic resource]. – (2012 a) Lamp (lighting). – Regime of access: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/328821/lamp>, free (date of the application: 17.03.2019).
2. Encyclopaedia britannica [Electronic resource]. – (2012 b) Candle (lighting). – Regime of access: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/92431/candle>, free (date of the application: 17.03.2019).
3. Encyclopaedia britannica [Electronic resource]. – (2012 c) Incandescent lamp. – Regime of access: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/284597/incandescent-lamp>, free (date of the application: 17.03.2019).
4. Encyclopaedia britannica [Electronic resource]. – (2012 d) Fluorescence. – Regime of access: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/211338/fluorescence>, free (date of the application: 17.03.2019).
5. Bowers B. Lengthening the Day. A history of Lighting Technology. Oxford: Oxford University Press, 1998.
6. Encyclopaedia britannica [Electronic resource]. – (2016) Luminescence. – Regime of access: <https://www.britannica.com/science/luminescence>, free (date of the application: 17.03.2019).
7. Morgan D. Plasma Lighting [Electronic resource] // MondoArc. – Electronic text data. – 2009. – Issue 50 August/September. – Regime of access: [http://www.dmadesign.co.uk/press/nov\\_2011/Mondo%20Arc%20Plasma%201.pdf](http://www.dmadesign.co.uk/press/nov_2011/Mondo%20Arc%20Plasma%201.pdf), free (date of the application: 17.03.2019). – Header from the screen.
8. Hunt R. W. G. Measuring colour. Ellis Horwood Series in Applied Science and Industrial Technology. Chichester : Ellis Horwood, 1987.
9. Murphy T. W. Maximum spectral luminous efficacy of white light. [Electronic resource] // Journal of Applied Physics. – Electronic text data. – 2011. – 111 (10) pp.1 – 7. – Regime of access: [http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/papers/JAP\\_111\\_104909.pdf](http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/papers/JAP_111_104909.pdf), free (date of the application: 18.04.2019). – Header from the screen.
10. C. H. Chen. GHz bandwidth GaAs light-emitting diodes / C. H. Chen, M. Hagrid, J. M. Woodall, M. R. Melloch, J. S. Reynolds, E. Yablonovitch, W. Wang. –Appl. Phys. Lett., 77, 1999. – P. 3140.
11. T. P. Lee. Effect of junction capacitance on the rise time of LEDs and on the turn-on delay of injection lasers / T. P. Lee. – Bell Syst. Tech. J., 54, 1975. – P. 53.
12. COB светодиоды и лампы на их основе. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ledjournal.info/spravochnik/cob-svetodiody-i-lampy.html>
13. Світлотехнічні розрахунки: навч. посібник / Л. А. Назаренко, Т. В. Можаровська, В. С. Чернець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – 142 с.

14. Світлодіоди: фізика, технологія виготовлення, застосування : навч. посібник / В. І. Карась, Л. А. Назаренко, І. В. Карась ; Харків. нац. академ. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 323 с.
15. Фізичні основи джерел світла : навчальний посібник для студ. вищих техніч.навч.закладів / Л. А. Назаренко ; Харків. нац. академ. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2009 . – 206 с.
16. Cree 231 Lumen Per Watt LED Shatters LED Efficacy Records. Cree press release. URL: [http://www.cree.com/press/press\\_detail.asp?i=1304945651119](http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1304945651119) (Lastaccessed: 16.04.2019).
17. LED Arrays: Seoul Semiconductor, Stanley, Sharp, Lustrous, Bridgelux, Luminus. LEDs Magazine. URL: <http://www.ledsmagazine.com/news/8/12/21?cmpid=EnlLEDsDecember212011> (Lastaccessed: 25.02.2018)
18. Cree's XLamp XP-G LED now delivers 140 lm/W in production. LEDs Magazine. URL: <http://www.ledsmagazine.com/press/32704?cmpid=EnlLEDsOctober122011> (Lastaccessed: 16.04.2019).
19. Смирнов В. Sharp LED – и мощно, и ярко / В. Смирнов, А. Туркин // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 2. – С. 14–17.
20. Avoiding thermal runaway when driving multiple LED strings. LEDs Magazine. URL: <http://www.ledsmagazine.com/features/6/2/2> (Lastaccessed: 16.05.2019).
21. Шуберт Ф. Е. Светодиоды / Ф. Е. Шуберт. – М. : Физматлит, 2008. – 496 с. : ил.
22. J. Hulett, C. Kelly. Measuring LED Junction Temperature. Photonics Spectra. URL: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=34316> (Lastaccessed: 17.06.2019).
23. Measuring Lumen Maintenance of LED light Sources. URL: <http://www.ies.org/store/product/approved-method-measuring-lumen-maintenance-of-led-light-sources-1096.cfm> (Lastaccessed: 16.05.2019).
24. Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED light Sources. URL: <http://www.ies.org/store/product/projecting-long-term-lumen-maintenance-of-led-light-sources-1253.cfm> (Lastaccessed: 28.04.2019).
25. Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products. URL: <http://www.ies.org/store/product/approved-method-.cfm> (Lastaccessed: 16.05.2019).
26. Objective Measurable Criteria of Lighting Quality – Transformation of the Ergonomic Lighting Indicator into a Measurable System / Dirthe Tralau, Til-Ulrich Wellman, Christoph Schierz // Proceedings of CIE2010 «Lighting Quality and Efficiency». – Vienna, 2010. CIE. – P. 78–81.

27. High-Quality Lighting : Energy-Efficiency That Enhances Employee Well-Being / Jennifer A. Veitch, Guy R. Newsham, Carol C. Jones, Chantal D. Arsenault, Sandra Mancini // Proceedings of CIE2010 «Lighting Quality and Efficiency». – Vienna, 2010. CIE. – P. 197–04.
28. Ки Донг Ли, Роберт Сжодин, Торбджорн Эрикссон. Нанотехнология увеличивает эффективность светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – № 5'2010. – С. 22–24.
29. Андреас Поль. Особенности расчета систем отвода тепла / Андреас Поль // Полупроводниковая светотехника. – № 5'2010. – С.54–57.
30. Криваткин А., Сакуненко Ю. Теплоотводящие пластмассы – вызов алюминию / А. Криваткин, Ю. Сакуненко // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 1. – С.54–56
31. Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов / К. Староверов // Новости электроники. – 2008. – № 17.
32. Faghri A. Heat pipe science and technology. Taylor & Francis. 1995.
33. Maydanik Yu. F. Loop Heat Pipes // Applied Thermal Engineering. 2005. V. 25. – 1992.
34. Кисеев В. М. Физика теплопередающих систем / В. М. Кисеев. – Екатеринбург: Изд-во УрГУ. – 2006. – С. 188.
35. Шевырева А. Решение Snop для охлаждения мощных светодиодов / А. Шевырева // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №3. – С.32–33.
36. Зелінський Р., Сорокін В. Особливості відводу тепла для світлодіодних ламп / Р. Зелинский, В. Сорокин // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Світотехніка і електроенергетика : Історія, проблеми, перспективи». – Тернопіль. – 2012. – С. 42–43.
37. Зелинский Р., Сорокин В. Разработка и исследование систем термостабилизации для мощных светодиодов / Р. Зелинский, В. Сорокин // Тезисы XX Международного симпозиума «Передовые дисплейные и световые технологии». – Крым, Украина, 8-12 октября, 2012 г. – С. 32.
38. Сорокин В. М. Организационно-экономические механизмы внедрения светодиодных осветительных систем в масштабах национальной экономики / В. М. Сорокин // Light Expert. – февраль. – 2012.– С. 7–14.
39. Sanjay Belgaonkar, E. Elavarasi, Gurjeet Singh Smart Lighting and Control using MSP430 & Power Line Communication / International Journal Of Computational Engineering Research, May-June 2012, Vol. 2 , Issue No. 3, Page 662–666.
40. Zexin Feng, Yi Luo and Yanjun Han. Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio // OPTICS EXPRESS 22031, October 2010, Vol. 18, No. 21, p. 22020–22031.

41. Світлові прилади : навч. посібник для студентів вищих технічних навчальних закладів / А. С. Литвиненко, О. Л. Черкашина ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 125 с.
42. Штучне зовнішнє освітлення : навчальний посібник / Л. А. Назаренко, К. І. Іоффе ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 88 с.
43. CIE 127:2007. Measurement of LEDs. – 2 nd ed.
44. CIE 18.2–1983. The Basis of Physical Photometry. – 2 nd ed.
45. Reports from CIE TC 2-37. Photometry using V – corrected Detectors as Reference and Transfer standards.
46. CIE 69–1987. Methods of charactering Illuminance Meters and Luminance Meters. Performance, characteristics and specifications.
47. CIE 63–1984. The Spectroradiometric Measurement of Light Sources.
48. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. First edition, 1993, ISO; Geneva, 1995.
49. CIE 70–1987. The Measurement of Absolute Luminous Intensity Distributions.
50. Stearns E. I. An Example of a method for Correcting Radiance Data for Band pass Error / E. I. Stearns, R. E. Stearns // Color Res. Appl. – 1988. – V. 13. – № 4. – P. 257 – 259.
51. LUMILEDS, «Application Brief AB05, Thermal Design Using LUXEON Power Lighting Sources» 2008.
52. Petroski J. «Spacing of high-brightness LEDs on metal substrate PCB's for proper thermal performance» in *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004. IThERM '04. The Ninth Intersociety Conference on*, 2004, pp. 507–514. – Vol. 2
53. A. Christensen and S. Graham, «Thermal effects in packaging high power light emitting diode arrays» *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 364–371, Feb 2009.
54. enLux Lighting. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <<http://www.enluxled.com/>>.
55. MatWeb, Material Property Data. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <<http://www.matweb.com/>>.
56. F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 5th ed. New York: J. Wiley, 2002.
57. Kolesnyk A. I. The research of thermal characteristics of the LEDs / A. I. Kolesnyk, L. A. Nazarenko // *Lighting engineering and power engineering*. – 2016. – No. 46 (2). – P. 27–30.

58. Конспект лекций по технической физике у трьох томах (Т. П. Электричество и магнетизм) : учеб. пособ. для высш. техн. учеб. завед. / К. К. Намитокон ; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2017. – 440 с.

59. Kim J. K., Luo H., Xi Y., Shah J. M., Gessmann T., and Schubert E. F. “Light extraction in GaInN light-emitting diodes using diffuse omnidirectional reflectors” Journal of the Electrochemical Society 153, G105 (2006).

60. Xi Y., Kim J. K., Mont F., Gessmann Th., Luo H., and Schubert E. F. “Quantitative assessment of diffusivity and specularity of surface-textured reflectors for light extraction in light-emitting diodes” manuscript in preparation (2006)

61. Palik E. D. Handbook of Optical Constants of Solids (Academic Press, San Diego, 1998)

62. Ohno Y. A Flexible Band pass Correction Method for Spectrometers / Y. Ohno // Proc. AIC Color 05 – 10<sup>th</sup> Congress for the International Color Association AIC’05, Granada, Spain, 9–13 May, 2005.

63. Основи радіометрії та фотометрії: монографія / Л. А. Назаренко, В. М. Сорокін // Харків : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – 352 с

64. Каталог компанії «Mean Well». [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.mean-well.ru/uploads/files/datasheets/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3+%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8+MeanWell.pdf>.

65. Product\_Catalog. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.elitesemicon.ca/2019\\_E-LITE\\_Product\\_Catalog\(rev.04\).pdf](http://www.elitesemicon.ca/2019_E-LITE_Product_Catalog(rev.04).pdf).

66. Sparrow E. M. and Vemuri S.B., Orientation effects on natural convection/radiation heat transfer from pin-fin arrays. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1986. – № 29. – P. 359–368.

67. MatWeb. Aluminium 384.0-F Die Casting Alloy. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=392ac894c0d642c0947f8d6b975d55de>.

68. Fluke Corporation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.fluke.com/>

69. Philips datasheet pdf catalog - First Page. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.datasheetcatalog.com/philips/1/>.

70. Booker J. D. Designing Capable and Reliable Products. / J. D. Booker, M. Raines, K. G. Swift. Butterworth-Heinemann, Oxford: – 2001. – P. 416.



## ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК

1. **COB** (Chip on Board) – технологія COB відрізняється тим, що на тепловідводній майданчику розташовані кілька світлодіодних чипів, які покриті загальним шаром люмінофора. Переваги цієї технології полягають у мініатюрності готової плати, покращеному тепловідведенні, простоті збірки світильника на основі COB, а також меншою вартістю.

2. **DIP** – найперший і масовий тип світлодіодів на сьогодні, але практично не використовується в сучасних високотехнологічних джерелах світла. Застосовується переважно в світлових табло, в різноманітних святкових світлових прикрасах.

3. **SLED** (SpiderLED, SuperfluxLED) – ці світлодіоди мають аналогічну конструкцію, що й попередники. Головною відмінністю є наявність чотирьох контактів замість двох. Це покращує тепловідвід і дає більшу надійність при монтажі, але через свої габарити практично не використовуються.

4. **SMD** – (над'яскраві світлодіоди, Surface Mounted Device) – це джерела світлодіодного освітлення потужністю від 1 Вт із силою струму 300 мА і вище, що володіють високою яскравістю світіння. Світлодіод потужністю 10 Вт отримують при використанні 10 таких світлодіодів у вигляді матриці.

5. **Активна область світлодіодного кристала (*p-n*-перехід)** – контакт двох напівпровідників із різними типами провідності. Для цього при контактні шари напівпровідникового кристала легують різними домішками: по один бік акцепторними, по інший – донорськими. Але не всякий *p-n*-перехід випромінює світло. Чому? По-перше, ширина забороненої зони в активній області світлодіода повинна бути близька до енергії квантів світла видимого діапазону. По-друге, ймовірність випромінювання при рекомбінації електронно-діркових пар повинна бути високою, для чого напівпровідниковий кристал повинен містити мало дефектів, через які рекомбінація відбувається без випромінювання. Ці умови тією чи іншою мірою суперечать одна одній. Реально, щоб дотримати обидві умови, одного *p-n*-переходу в кристалі виявляється недостатньо, і доводиться виготовляти багат шарові напівпровідникові структури, так звані гетероструктури, за вивчення яких російський фізик академік Жорес Алфьоров одержав Нобелівську премію 2 000 року.

6. **Амперметр** (ammeter) – прилад для вимірювання сили струму.

7. **Блискавість** – відчуття появи яскравих зон у межах поля зору, таких як світлові поверхні, частини світильників, вікна та/чи вікна верхнього світла. Блискавість необхідно обмежувати, щоб уникнути помилок, втоми, нещасних випадків.

8. **Блок живлення** (джерело струму) (*LED light driver*) – це електротехнічний прилад на виході якого утворюється випрямлений струм в діапазоні від 350 мА до 700 мА залежно від моделі світильника необхідний для живлення світлодіодів.

9. **Ватметр** (wattmeter) – прилад для вимірювання активної потужності.

10. **Вимірювач коефіцієнта потужності** (power factor meter) – прилад для вимірювання відношення активної потужності до повної в електричному колі.

11. **Вольтметр** (voltmeter) – прилад для вимірювання напруги.

12. **Джерело живлення сталої напруги** (constant voltage power supply) – джерело живлення, яке стабілізує вихідну напругу стосовно змінень впливних величин.

13. **Джерело світла** – тіла, які випромінюють електромагнітні хвилі оптичного діапазону (видимі, інфрачервоні та ультрафіолетові промені).

14. **Дифракція світла** – це сукупність явищ, визначених хвильової природою світла, які спостерігаються при поширенні оптичних хвиль у середовищі з різко вираженими неоднорідностями.

15. **Енергетичні величини** – характеризують енергетичні параметри оптичного випромінювання безвідносно до його дії на приймач випромінювання;

16. **Індекс кольоропередачі CRI(R)** – відносна величина, що введена для забезпечення об'єктивної оцінки кольоропередачі джерела світла. Максимальне значення  $R_a$  становить 100.

17. **Інтерференція** – це явище збільшення або зменшення амплітуди результуючої хвилі при складанні двох або декількох хвиль, що мають однакові частоти коливань.

18. **Кліматичне виконання** – види кліматичного виконання машин, приладів та інших технічних виробів. Кліматичне виконання, зазвичай, вказується в останній групі знаків позначень технічних пристроїв. Буквена частина позначає кліматичну зону: У – помірний клімат; ХЛ – холодний клімат; УХЛ – помірний і холодний клімат. Наступна за буквеної цифрова частина означає категорію розміщення.

19. **Коефіцієнт запасу** – розрахунковий коефіцієнт, що враховує зниження освітленості в процесі експлуатації внаслідок забруднення та старіння світлопрозорих заповнень у світлових прорізах, джерел світла й світильників, а також зниження відбивальних властивостей поверхні приміщення.

20. **Коефіцієнт пульсацій світлового потоку** – відношення різниці між максимальним і мінімальним значеннями світлового потоку до суми цих значень.

21. **Колірна температура** – температура випромінювача Планка (абсолютно чорного тіла), за якої його випромінювання має ту саму кольоровість, що й випромінювання об'єкта, що розглядається. Вимірюється в кельвінах (К). Менше числове значення (менше 3 300 К) відповідає «теплому» відтінку світла, більше значення (4 600 К та більше) – «холодному» відтінку.

22. **Корпус світлодіодного світильника** зазвичай виконаний із алюмінію або іншого тепловідводної матеріалу. Основне завдання корпусу світлодіодного світильника – це відведення надлишкового тепла від світлодіода. Нормальною вважається температура радіатора від 35 °С до 50 °С. Також корпус повинен бути надійним і вологостійким.

23. **Кут розсіювання** – кут половинній яскравості, іноді також званий кутом світіння – одна з величин, які допомагають описати джерело світла. Цей кут показує, наскільки спрямований або розсіяний джерело світла. Його визначають як кут світлового конуса, при якому сила світла джерела дорівнює половині його максимальної сили.

24. **Люкс** (від лат. *Lux* – світло: – російське позначення: лк, міжнародне позначення: lx) – одиниця виміру освітленості.

25. **Люмен** (позначення: Лм, lm) – одиниця виміру світлового потоку світлодіода).

26. **Напівпровідникове джерело світла.** В останні роки, крім цих двох типів, з'явився і почав все активніше втручатися в усі сфери третій тип електричних джерел світла – напівпровідниковий. За прогнозами фахівців, саме цього нового типу належить майбутнє – вже років через 10–12 може початися масове повсюдне впровадження напівпровідникових джерел світла – світлодіодів – не тільки для світлової сигналізації, де вони вже сьогодні становлять серйозну конкуренцію традиційним лампам розжарювання, а й для загального освітлення.

27. **Об'єктивна фотометрія** – оперує поняттями енергії, потужності та потоку енергії та застосовна до будь-яких хвиль.

28. **Освітленість** – величина світлового потоку, що падає на одиницю поверхні, вимірюється в люксах (лк).

29. **Пасивні методи охолодження** – визначаються як ті, які виникають природним чином у відповідь на фізичні умови, встановлені при роботі світлового приладу. Тому вони не вимагають додаткової рушійної сили або енергоспоживання для забезпечення передачі тепла, що робить їх за своєю природою надійними та ефективними. Найбільш поширеним і основним пасивним пристроєм терморегулювання є радіатор із природним конвекційним охолодженням.

30. **Показник дискомфорту «М»** – його величина характеризує ступінь дискомфорту, який виникає внаслідок наявності блискоту або нерівномірного розподілу яскравості.

31. **Показник Засліплення «Р»** – за назвою стає зрозумілим, що він є критерієм сліпучої дії світла. Висока засліпленість виникає, якщо в поле зору потрапляє світло з блискотом. Це негативно впливає на продуктивність роботи й зорову працездатність. Чим вищий розряд точності роботи, тим меншою має бути величина засліпленості.

32. **Принцип Френеля – Гюйгенса** – кожна точка середовища, до якої дійшла хвиля, є самостійним джерелом вторинних хвиль; новий фронт хвилі утворюється внаслідок інтерференції.

33. **Радіатор охолодження** – це формена деталь, яка має властивості відведення теплової маси від джерела світла (світлодіоди), який її виділяє. Радіатор сприяє збільшенню терміну служби й підвищенню коефіцієнта корисної дії LED-джерел світла. Правильно підібрана форма радіатора виключає постійні перегріву світлодіодів.

34. **Світлова ефективність або світлова віддача** – відношення випроміненого світлового потоку до споживаної джерелом потужності. Одиницею вимірювання є люмен/ват (лм/Вт).

35. **Світлове середовище** – сукупність показників освітлення, які мають потенційний вплив на організм людини.

36. **Світловий потік** – фізична величина, пропорційна потоку випромінювання, оціненому відповідно до середньостатистичної відносної спектральної чутливості людського ока. Одиницею вимірювання є люмен (лм).

37. **Світлові величини** – характеризують дії світла й оцінюються за впливом на око (з огляду на так звану середню чутливість ока) або інші приймачі випромінювання.

38. **Світлодіод** (СД, СІД, англ. LED – Light-emitting diode) – напівпровідниковий прилад (діод), який випромінює світло при пропусненні через нього електричного струму. Існує велика кількість різних напівпровідникових матеріалів, із яких роблять світлодіоди, до того ж характеристики світлодіодів (колір світіння, яскравість світіння тощо) залежать від хімічного складу даних матеріалів.

39. **Світлодіодний модуль** – це пристрій або частина пристрою певного розміру з декількома працюючими спільно світлодіодами, що становить єдиний керований світлодіодний випромінювач.

40. **Світлодіодний світильник (LED lamp)** – це освітлювальний прилад, основними елементами якого є напівпровідниковий елемент – світлодіод, як джерело світла, джерело живлення, корпус-радіатор, оптичний елемент.

41. **Ступінь захисту IP** (International/Ingress Protection Rating) – класифікатор ступенів захисту, що регламентує проникнення сторонніх об'єктів – пилу й води відповідно до міжнародного стандарту IEC 60529

42. **Суб'єктивна фотометрія** – оперує величинами, які спираються на характер сприймання світла оком людини.

43. **Теплопровідність** – здатність матеріальних тіл до переносу енергії (теплообміну) від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих частинах тіла, що здійснюється хаотично рухаються частками того самого тіла. Такий теплообмін може відбуватися в будь-яких тілах із неоднорідним розподілом температур. Найчастіше в світлодіодному обладнанні, для відводу надлишків тепла використовується алюміній, або його сплави, через високу теплопровідність і зручність використання.

44. **Технологія виробництва** – головним елементом світлодіода є кристал, що перетворює електричну енергію в світло. Вирощування кристала відбувається на сапфірових пластинах. У спеціальному реакторі на пластину проводиться напilenня газів азоту, Німеччина та Індія. Вони взаємодіють один з одним і утворюють кристалічний шар. Після цього на пластину з вирощеними кристалами наноситься захисний шар і електричні контакти, поступово формуючи світлодіодний чип. На наступному етапі чип поміщається в корпус і з'єднується із зовнішніми контактами, а далі заливається епоксидним гелем або силіконом. Після цих операцій виходить світлодіод, який вже здатний випромінювати світло, але він буде дуже неприємного синього кольору. На останньому етапі на світлодіодні чіпи наноситься гелева суміш, що містить люмінофор, яка дає змогу перетворити синє світло в білий, певного відтінку.

45. **Фотометр** – (від гр. Φωτόνιο – світло й метр) оптичний прилад, яким вимірюють світлові величини (силу світла, світловий потік, освітленість, яскравість тощо).

46. **Фотометрія** – розділ оптики, що займається питаннями виміру інтенсивності світла і його джерел.

47. **Фотон** (гр. Φωτόνιο – світло) частинка світла, порція електромагнітного проміння будь-якої частоти. Ф. називають також квантами (квант світла, гамма-квант тощо).

48. sRGB – колірний простір, який було прийнято як стандарт вимірювання кольору компаній Microsoft, HP і інших у 1996 році.

49. NTSC – колірний стандарт, був розроблений американським Національним комітетом з телевізійних систем у 1953 році.

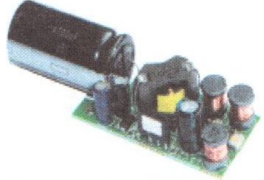
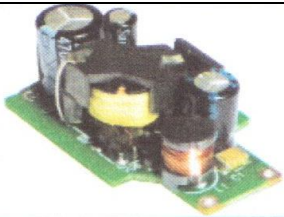
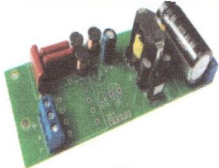
## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Результати досліджень параметрів експериментальних модулів у корпусі Lead Frame 3003 потужністю 4 Вт з різними типами й концентраціями люмінофорів



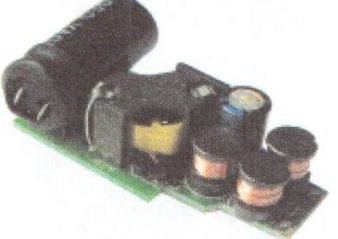
СДМ, %	I(A)	U(B)	P(Вт)	Тип кристала	ККД, %	Концентрація	Люмінофор	Колірна температура, К	Світловий потік, лм	Світлова віддача, лм/Вт	Колірне передавання, Ra
101	0,35	12,3	4,31	Epistar ES-CABL V45P	42	1:15	Жовтий	4 492	529	123	60,8
	0,17	11,6	1,97			1:15	Жовтий	4 488	227	141	60,9
102	0,35	12,3	4,31	Epistar ES-CABL V45P	42	1:30	Жовтий	5 517	494	115	65,2
	0,17	11,6	1,97			1:30	Жовтий	5 484	260	130	65,2
103	0,35	12,3	4,31	Epistar ES-CABL V45P	42	1:10:300	Жовто- помаранч.	4 482	456	106	68,2
	0,17	11,6	1,97			1:10:300	Жовто- помаранч	4 474	241	123	68,3
104	0,35	12,3	4,31	Epistar ES-CABL V45P	42	1:10:240	Жовто- помаранч	4 482	455	105	69,7
	0,17	11,6	1,97			1:10:240	Жовто- помаранч	4467	237	120	69,8

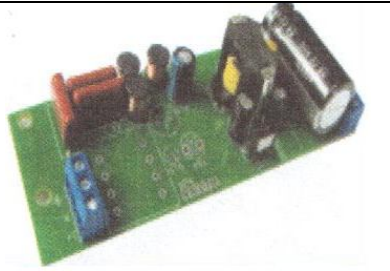
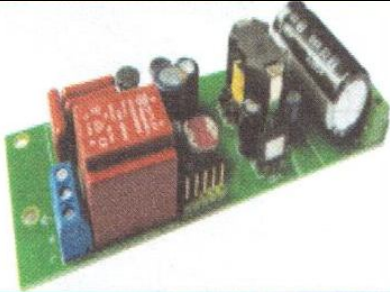

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Параметри та характеристики розроблених схем та порівняння їх із зарубіжними аналогами

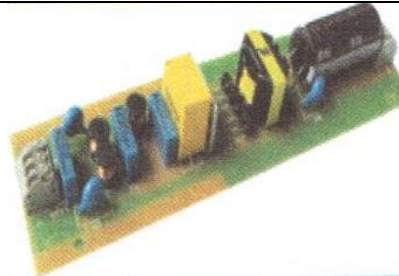

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип драйвера (децимальний номер)	Призначення	Струм стабілізований, мА	Діапазон вихідних напруг, В	Діапазон вхідних напруг, В	ККД, %	Коефіцієнт потужності	К <sub>пульсацій</sub> світлового поток, %	Зображення
ДВА. 436541.001	Драйвер лінійки на 7 світлодіодів	350	DC 19–23	AC 180–250	85	0,95	<5	
Аналог APC-12		350	DC 9–36	AC 90–264	80	0,5	<1	
ДВА. 436541.002	Драйвер лампи 7 Вт	350	DC 12–20	AC 80–250	86	>0,95	<30	
Аналог світлокомплект 60 10W SMD19		–	–	AC 180–250	–	>0,5	1	
ДВА. 436541.003	Драйвер для ЖКГ світильника без керування	350	DC 18–20	AC 180–250	86	>0,95	<6	
Аналог LA12Y		350	DC 9–32	AC 100–240	78	>0,85	<6	



1	2	3	4	5	6	7	8	9
ДВА. 436541.004	Драйвер лампы для 4 Вт без гальванічної розв'язки	45	DC 80–88	AC 180–250	90	>0,9	<5	
Аналог Maxus 1-LED-324		–	–	AC 200–240	–	>0,6	<100	
ДВА. 436541.005	Драйвер лампы для 5 Вт без гальванічної розв'язки	45	DC 100–10	AC 180–250	91	>0,9	<6	
Аналог Maxus 1-LED-237		–	–	AC 200–240	–	>0,3	100	
ДВА. 436541.006	Драйвер лампы з гальванічною розв'язкою	350	DC 15–20	AC 180–250	87	>0,95	<15	
Аналог SvetaLED 6W		-	-	AC 180–250	-	0,4	5	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ДВА. 436544.001	Драйвер для ЖКГ світильника без керування	350	DC 18–40	AC 180–250	86	>0,95	<10	
Аналог PCD-16		350	DC 24–48	AC 115–250	82	>0,9	–	
ДВА. 436544.002	Драйвер для ЖКГ світильника з керуванням	350	DC 18–40	AC 180–250	82	>0,95	<10	
Аналог PCD-16		350	DC 24–48	AC 115–250	82	>0,9	–	
ДВА. 436544.003	Драйвер для ЖКГ світильника без керування	350	DC 24–40	AC 180–250	86	>0,95	<10	
Аналог LA20H-350		350	DC 9–48	AC 180–264	82	>0,5	–	



1	2	3	4	5	6	7	8	9
ДВА. 436544.008	Драйвер для растрового світильника 13 Вт	440	DC 24–28	AC 180–250	86	>0,95	<8	
Аналог PCD-16		350	DC 24–48	AC 115–250	82	>0,9	–	
ДВА. 436544.008-01	Драйвер для растрового світильника 24 Вт	850	DC 24–28	AC 180–250	87	>0,95	<8	
Аналог PCD-16- 1050		1 050	DC 16–24	AC 115–277	80,5	>0,9	–	

*Навчальне видання*

**НАЗАРЕНКО** Леонід Андрійович,  
**КОЛЕСНИК** Анастасія Ігорівна

## **ФІЗИКА І ТЕХНІКА СВІТЛОДІОДІВ**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

Відповідальний за випуск *О. М. Ляшенко*

Редактор *В. І. Шалда*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

Дизайн обкладинки *Т. А. Лазуренко*

Підп. до друку 11.10.2019. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 14,9.

Тираж 50 пр. Зам. № 10244.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [office@kname.edu.ua](mailto:office@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.

